

**ALTERNATIVA DE TRATAMIENTO DE AGUAS PROVENIENTES DE PISCINAS  
TERMALES DE PAIPA PARA EL POSTERIOR VERTIMIENTO EN EL RÍO  
CHICAMOCHA.**

**LAURA DANIELA DUARTE SABOGAL  
MARIANA MOSQUERA FORERO**

**PROYECTO INTEGRAL DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE  
INGENIERO QUÍMICO**

**DIRECTOR  
JUAN CAMILO CELY GARZÓN  
INGENIERO QUÍMICO**

**CO-DIRECTOR  
IVÁN RAMIREZ MARÍN  
INGENIERO QUÍMICO**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BOGOTÁ D.C**

**2021**

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

---

---

---

---

---

---

Juan Camilo Cely Garzón  
Firma del Director

---

Diana Marcela Cuesta P.  
Firma del Jurado

---

Oscar Libardo Lombana C.  
Firma del Jurado

Bogotá D.C. Agosto de 2021

## **DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

**Dr. MARIO POSADA GARCÍA-PEÑA**

Consejero Institucional

**Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA**

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

**Dra. MARÍA CLAUDIA APONTE GONZÁLEZ**

Vicerrector Administrativo y Financiero

**Dr. RICARDO ALFÓNSO PEÑARANDA CASTRO**

Secretaria General

**Dra. ALEXANDRA MEJÍA GUZMÁN**

Decano General de la Facultad de Ingeniería

**Ing. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI**

Director Programa de Ingeniería Química

**Ing. NUBIA LILIANA BECERRA OSPINA**

## **AGRADECIMIENTOS**

Principalmente, agradecemos al personal del Instituto Turístico de Paipa por el apoyo, la confianza, las herramientas e información brindada para continuar con el proceso de investigación y culminación del presente documento.

A la Fundación Universidad de América por brindarnos los conocimientos necesarios para la realización de este trabajo de grado.

A los Ingenieros Químicos Iván Ramírez Marín y Juan Camilo Cely Garzón por su acompañamiento, recomendaciones y conocimientos aportados durante el desarrollo del proyecto.

Al alcalde Fabio Medrano y la gerencia del ITP que estuvo a cargo de coordinar las actividades del primer periodo del 2021 por su colaboración y apoyo durante las campañas realizadas en el instituto.



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
<b>RESUMEN</b>	12
<b>INTRODUCCIÓN</b>	13
<b>OBJETIVOS</b>	15
<b>Objetivo general</b>	<b>15</b>
<b>Objetivos específicos</b>	<b>15</b>
<b>1. MARCO TEÓRICO</b>	16
<b>1.1. Tipo de corrientes hídricas</b>	<b>16</b>
1.1.1. <i>Sulfatadas</i>	16
1.1.2. <i>Cloruradas</i>	17
1.1.3. <i>Bicarbonatadas</i>	17
<b>1.2. Tratamiento de aguas</b>	<b>17</b>
1.2.1. <i>Tratamiento primario</i>	18
1.2.2. <i>Tratamiento secundario</i>	18
1.2.3. <i>Tratamiento terciario</i>	18
<b>1.3. Parámetros</b>	<b>20</b>
1.3.1. <i>DBO</i>	20
1.3.2. <i>DQO</i>	20
1.3.3. <i>Grasas y aceites</i>	20
1.3.4. <i>Iones cloruro</i>	20
1.3.5. <i>Iones sulfato</i>	20
1.3.6. <i>Conductividad</i>	21
<b>1.4. Marco legal</b>	<b>21</b>
<b>2. DESCRIPCIÓN DEL ESTADO ACTUAL DEL AGUA PROVENIENTE DE PISCINAS TERMALES DE PAIPA CON VERTIMIENTO AL RÍO CHICAMOCHA</b>	24
<b>2.1. Descripción de los efectos del vertimiento de aguas residuales con alto contenido de sulfatos y cloruros en afluentes naturales</b>	<b>24</b>
<b>2.2. Caracterización del flujo de vertimiento de aguas termales en el sector turístico</b>	<b>36</b>
<b>2.3. Contexto del municipio de Paipa</b>	<b>37</b>
<b>2.4. Descripción de la campaña de muestro en un instituto termal de Paipa</b>	<b>46</b>

<b>3. SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA PARA EL TRATAMIENTO DE IONES SULFATOS Y CLORUROS DE LAS AGUAS PROVENIENTES DE PISCINAS TERMALES TENIENDO EN CUENTA CRITERIOS TÉCNICOS Y AMBIENTALES</b>	<b>67</b>
<b>3.1. Revisión bibliográfica de pretratamientos, tratamientos primarios, secundarios y terciarios</b>	<b>67</b>
3.1.1. <i>Primera fase de tratamiento</i>	68
3.1.2. <i>Segunda fase de tratamiento</i>	75
<b>3.2. Análisis de la eficiencia de tratamientos de agua según casos de estudio teniendo en cuenta los criterios establecidos para la tecnología a proponer en vertimientos termales</b>	<b>90</b>
3.2.1. Adsorción de iones cloruro en vertimientos utilizando carbón activado comercial	90
3.2.2. Adsorción de iones cloruro utilizando carbón activado de conchas de coco modificado	95
3.2.3. Remoción de iones cloruro en efluentes utilizando fibras de fique naturales y modificadas químicamente	96
3.2.4. Remoción de iones cloruro en efluentes utilizando hidrotalcitas	98
3.2.5. Extracción de sulfatos por medio de intercambio iónico en la industria metalúrgica	99
3.2.6. Intercambio iónico como pretratamiento para aguas de procesos de producción de aceite	100
3.2.7. Intercambio iónico y osmosis inversa para remoción de cloruros en aguas residuales de la industria petrolera	102
3.2.8. Remoción de sulfatos en corrientes de la industria minera por tecnología de membrana (ósmosis inversa)	104
3.2.9. Remoción de iones cloruros en aguas residuales de desulfuración de gases	105
<b>3.3. Definición de los criterios considerados para seleccionar y evaluar las alternativas de tratamiento</b>	<b>111</b>
<b>3.4. Elaboración de matrices de selección para una alternativa de tratamiento de aguas provenientes de piscinas termales de Paipa con vertimiento al río Chicamocha</b>	<b>112</b>
<b>3.5. Descripción del secuenciamiento para tratamiento de aguas termales partiendo de los resultados de las matrices de decisión</b>	<b>118</b>
<b>4. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUAS PROVENIENTES DE PISCINAS TERMALES PARA LA ALTERNATIVA SELECCIONADA</b>	<b>119</b>

<b>4.1. Parámetros de proceso y condiciones de operación para la adsorción por carbón activado granular en una columna de lecho móvil</b>	<b>120</b>
<b>4.2. Estimación de la capacidad de adsorción y porcentaje de remoción del carbón activado como adsorbente</b>	<b>127</b>
<b>4.3. Variables de proceso para el tratamiento de Intercambio Iónico</b>	<b>128</b>
<b>4.4 Especificaciones de equipos y materias primas para el proceso de intercambio iónico</b>	<b>131</b>
4.4.1 Equipos para la etapa de intercambio iónico	131
4.4.2 Materias primas para la etapa de intercambio iónico	131
<b>4.5 Dimensionamiento de la columna de intercambio iónico</b>	<b>132</b>
4.5.1 <i>Tipo de sistema</i>	132
4.5.2 <i>Material de la columna</i>	132
4.5.3 <i>Carga aniónica</i>	132
4.5.4 <i>Duración del ciclo</i>	133
4.5.5 <i>Oferta iónica</i>	133
4.5.6 <i>Capacidad operativa de intercambio</i>	134
4.5.7 <i>Volumen del lecho de resina</i>	134
4.5.8 <i>Dimensionamiento de la columna de intercambio</i>	134
4.5.9 <i>Acondicionamiento de las resinas</i>	136
4.5.10 <i>Disposición</i>	136
4.5.11 <i>Velocidad de la corriente</i>	136
4.5.12 <i>Retrolavado</i>	137
4.5.13 <i>Regeneración</i>	137
4.5.14 <i>Lavado</i>	141
<b>5. CONCLUSIONES</b>	<b>144</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>145</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>156</b>

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1.</b> Resolución 0631 Art. 15 Parámetros fisicoquímicos	22
<b>Figura 2.</b> Mapa Río Chicamocha	26
<b>Figura 3.</b> Índice de calidad de Aguas- ICA, en algunas estaciones del Río Chicamocha	30
<b>Figura 4.</b> Ubicación del volcán Cerro Machín	40
<b>Figura 5.</b> Coordenadas de la zona de estudio	42
<b>Figura 6.</b> Mapa tectónico de la península de Shandong, China	43
<b>Figura 7.</b> Canal de Vargas del Instituto Termal de Paipa	49
<b>Figura 8.</b> Dimensiones de la piscina olímpica	51
<b>Figura 9.</b> Dimensiones de la piscina panorámica	52
<b>Figura 10.</b> Dimensiones de la piscina cisnes	53
<b>Figura 11.</b> Instituto termal de Paipa	54
<b>Figura 12.</b> Precipitación en Duitama en el mes de marzo del 2021	56
<b>Figura 13.</b> Muestras tomadas el 18/03/2021 en campaña de muestreo	57
<b>Figura 14.</b> Muestras tomadas el 19/03/2021 en campaña de muestreo	58
<b>Figura 15.</b> Muestras tomadas el 20/03/2021 en campaña de muestreo	59
<b>Figura 16.</b> Relación de iones cloruros y precipitación diaria en las horas de captación de la campaña de muestreo	62
<b>Figura 17.</b> Relación de iones cloruros y precipitación diaria en campaña de muestreo	63
<b>Figura 18.</b> Distribución de la red hidráulica del ITP	65
<b>Figura 19.</b> Carbón activado granular	68
<b>Figura 20.</b> Columna de tratamiento de agua residual con CAG	71
<b>Figura 21.</b> Representación esquemática de resinas de intercambio iónico	76
<b>Figura 22.</b> Estructura química del estireno	79
<b>Figura 23.</b> Estireno polimerizado	79
<b>Figura 24.</b> Segundo enlace de la molécula DVB	80
<b>Figura 25.</b> Funcionamiento del proceso de ósmosis inversa	83
<b>Figura 26.</b> Principio de la electrodiálisis	87
<b>Figura 27.</b> Tipos de espaciadores	89
<b>Figura 28.</b> Determinación del tiempo de equilibrio en la adsorción de Cl <sup>-</sup> sobre carbón activado a diferentes valores de pH	93
<b>Figura 29.</b> Filtro de CAG con flujo descendente en un tanque a presión	94
<b>Figura 30.</b> Resultados de la encuesta a profesionales y expertos acerca de la importancia de los criterios más relevantes de los tratamientos de aguas	113
<b>Figura 31.</b> Columna de lecho móvil con regeneración	126
<b>Figura 32.</b> Grafica de tendencia del porcentaje de remoción de iones cloruro	127
<b>Figura 33.</b> Grafica de tendencia de la capacidad de adsorción de iones cloruro	128
<b>Figura 34.</b> Concentración de iones cloruro en la corriente de salida en función del tiempo de contacto	130

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1.</b> Calificación de calidad del agua según los valores tomados del ICA	29
<b>Tabla 2.</b> Resultados fisicoquímicos del año 2019	33
<b>Tabla 3.</b> Comparación entre diferentes aguas termales del mundo con 4 variables	44
<b>Tabla 4.</b> Resultados campaña de muestreo para vertimientos termales en Paipa 2021	60
<b>Tabla 5.</b> Capacidad total de las resinas de intercambio iónico	77
<b>Tabla 6.</b> Comparación de las capacidades de adsorción de otros materiales y las obtenidas con fique modificado	98
<b>Tabla 7.</b> Características de resinas de intercambio iónico	107
<b>Tabla 8.</b> Características de sistema y membrana de osmosis inversa	109
<b>Tabla 9.</b> Características de membranas para electrodiálisis	110
<b>Tabla 10.</b> Nivel de importancia de los criterios de evaluación	114
<b>Tabla 11.</b> Descripción de los niveles asignados a cada factor	115
<b>Tabla 12.</b> Matriz de decisión realizada para la selección del primer tratamiento de la propuesta de secuenciamiento	116
<b>Tabla 13.</b> Matriz de decisión realizada para la selección del segundo tratamiento de la propuesta de secuenciamiento	117
<b>Tabla 14.</b> Parametros para la selección de CAG para adsorción según la ASTM/ANSI/AWWA	120
<b>Tabla 15.</b> Datos del CAG seleccionado	124
<b>Tabla 16.</b> Condiciones empleadas para el secuenciamiento de tratamiento de aguas termales	142

## LISTA DE ECUACIONES

	Pág
<b>Ecuación 1</b> Fórmula para el Índice de calidad de aguas-ICA	31
<b>Ecuación 2.</b> Fórmula para el cálculo de cloruros	47
<b>Ecuación 3.</b> Fórmula para el cálculo de sulfatos	48
<b>Ecuación 4.</b> Capacidad de adsorción	125
<b>Ecuación 5.</b> Cantidad retenida sobre el adsorbente	125
<b>Ecuación 6.</b> Ecuación de Freundlich	125
<b>Ecuación 7.</b> Tiempo de duración de cada ciclo	133
<b>Ecuación 8.</b> Oferta iónica	133
<b>Ecuación 9.</b> Volumen de resina	134
<b>Ecuación 10.</b> Área de flujo	134
<b>Ecuación 11.</b> Altura de la resina	135
<b>Ecuación 12.</b> Altura del lecho expandido	135
<b>Ecuación 13.</b> Altura de la resina inactiva	135
<b>Ecuación 14.</b> Altura total de la columna de intercambio	136
<b>Ecuación 15.</b> Velocidad de la corriente	136
<b>Ecuación 16.</b> Caudal de retrolavado	137
<b>Ecuación 17.</b> Capacidad operativa instalada	137
<b>Ecuación 18.</b> Volumen de agua para la solución regenerante	138
<b>Ecuación 19.</b> Tiempo entre regeneración	138
<b>Ecuación 20.</b> Cantidad de NaOH para la solución regenerante	139
<b>Ecuación 21.</b> Cantidad de agua para la solución regenerante	139
<b>Ecuación 22.</b> Caudal de regeneración	140
<b>Ecuación 23.</b> Velocidad de regeneración	140
<b>Ecuación 24.</b> Tiempo de regeneración	140

## RESUMEN

En el municipio de Paipa, ubicado en el departamento de Boyacá, se encuentra un complejo turístico que enfoca sus actividades en el aprovechamiento de las aguas termales. Los vertimientos generados que se dirigen hacia el río Chicamocha, que satisface una gran demanda de agua solicitada para consumo humano y doméstico, agrícola, pecuario, recreativo e industrial. Por esta razón, este proyecto tiene como objetivo el planteamiento de un diseño conceptual para el tratamiento de aguas provenientes de las piscinas termales que favorezca la reducción de iones sulfatos y cloruros.

Esta propuesta se realiza con base al estado actual del vertimiento determinado por medio de una campaña de muestreo, tipo puntual, en la cual se realizaron análisis químicos de los parámetros de interés, que demostraron que la concentración de iones cloruro supera en un 2305,5% la normativa establecida de un valor mínimo de 250 mg Cl<sup>-</sup>/L.

Se llevó a cabo una revisión bibliográfica y una encuesta con preguntas de orden jerárquico las cuales fueron estudiadas con análisis de tendencia, donde finalmente se determina un proceso de adsorción con carbón activado granular e intercambio iónico para el secuenciamiento propuesto, obteniendo una eficiencia teórica de remoción de 67,88-74,79% para la primera etapa y el dimensionamiento de la unidad de intercambio iónico para la segunda fase de tratamiento.

**PALABRAS CLAVES:** Piscinas termales, carbón activado, intercambio iónico, adsorción, cloruros.



## INTRODUCCIÓN

Las aguas termales representan un gran atractivo turístico para las ciudades, son una fuente de recreación y descanso para la comunidad, además de brindar beneficios para la salud. En el territorio nacional es posible encontrar un gran número de manantiales termales, que pueden ser aprovechados de forma responsable por las comunidades aledañas, favoreciendo el desarrollo del turismo en diferentes regiones del país.

En el municipio de Boyacá se encuentra el Instituto de Turismo de Paipa, centro recreativo que cuenta con piscinas termales que le permiten al usuario disfrutar de este recurso hídrico y aprovechar los beneficios que ofrece este tipo de actividades.

Este sector turístico genera corrientes de desecho que, por la naturaleza de las aguas termales que se emplean para abastecer las piscinas dentro del complejo y por las actividades que se desarrollan, presentan una concentración elevada de iones cloruros y una concentración despreciable de iones sulfatos, de acuerdo a los resultados obtenidos durante la campaña de muestreo. Considerando que estos vertimientos que llegan al río Chicamocha, que abastece durante su recorrido a los agricultores de la zona que se abastecen de estas aguas para diferentes actividades como el riego de los cultivos, en el presente proyecto se establece un secuenciamiento de tratamientos terciarios efectivos para la remoción de estos iones, a un nivel aceptado por entidades reguladoras como Corpoboyacá.

Mediante una búsqueda bibliográfica fue posible determinar diferentes alternativas de tratamiento terciarios que permiten la remoción de iones de las corrientes de agua. Se destacan fíque, hidrotalcita, carbón y biocarbón activado para una primera etapa de tratamiento e intercambio iónico, osmosis inversa y electrodiálisis para una segunda etapa. Así, por medio de la revisión de casos de estudio donde se emplearon estas alternativas, fue posible determinar la eficiencia de estos tratamientos, así como los factores de importancia que se deben considerar para la implementación.

Además, se establecieron criterios de decisión que, por medio de una Matriz Pugh de acuerdo al nivel de importancia establecido para cada factor, permitieron establecer que

alternativa representa la mejor opción de tratamiento de acuerdo a los requerimientos. Se seleccionó carbón activado como tratamiento para la primera fase e intercambio iónico como tratamiento para la segunda fase.

Por último, se lleva a cabo la especificación de las condiciones de operación de la unidad de adsorción por carbón activado y el dimensionamiento de la unidad de intercambio iónico para tratar la corriente de salida de las piscinas termales, teniendo en cuenta las variables críticas de cada etapa. Es posible considerar esta alternativa para la implementación en diferentes centros turísticos, que basan su actividad en el uso de aguas termales, disminuyendo el impacto ambiental generado por las corrientes de descarga.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Proponer un diseño conceptual para el tratamiento de aguas provenientes de piscinas termales de Paipa que favorezca la reducción de iones sulfatos y cloruros para el posterior vertimiento en el Río Chicamocha.

### **Objetivos específicos**

1. Describir el estado actual del agua proveniente de piscinas termales de Paipa con vertimiento al Río Chicamocha.
2. Seleccionar la tecnología para el tratamiento de iones sulfatos y cloruros de las aguas provenientes de piscinas termales teniendo en cuenta criterios técnicos y ambientales.
3. Establecer las especificaciones técnicas del proceso de tratamiento de aguas proveniente de piscinas termales para la alternativa seleccionada.

## 1. MARCO TEÓRICO

Se denomina agua termal a aquella que emana a la superficie con una temperatura 5°C más alta que la temperatura media anual del lugar donde emana. El paso del agua entre distintas capas subterráneas, en las cuales las rocas están a alta temperatura y producen el calentamiento del agua [1]. Las características físico-químicas de estas aguas vienen dadas por los terrenos de donde provienen, Por ello su contenido en sales, temperatura y características hidrológicas son muy variables [2].

Teniendo en cuenta la temperatura a la que se encuentre el agua subterránea, se disolverán distintos tipos de minerales, por lo que es importante hacer una clasificación de los distintos tipos de aguas termales en función de su origen, temperatura, origen geológico, composición química y composición mineral.

Las fuentes de agua termal están unidas esencialmente al concepto de ascensión de aguas profundas. Entre los accidentes geológicos que favorecen la circulación del agua se encuentran: diaclasas y fisuras finas, fallas y zonas de milonitización, contactos geológicos, filones y diques eruptivos y filones metalíferos. Dentro de los mecanismos de surgencia de las aguas termales se tiene que puede ser por expansión de vapor de agua [2].

### 1.1. Tipo de corrientes hídricas

Para la clasificación de este tipo de corrientes hídricas se tienen en cuenta características como la mineralización predominante, dándole carácter de predominante a aquellos gases, aniones y cationes que representan más del 20% de la masa iónica correspondiente [3]. Por esta razón se considera la siguiente clasificación:

#### 1.1.1. *Sulfatadas*

Con más de 1 g/L de sustancias mineralizantes, donde predomina el anión sulfato y están influidas fuertemente en sus propiedades terapéuticas por otros iones como sodio, magnesio, bicarbonato y cloruro.

### **1.1.2. Cloruradas**

Con más de 1 g/L de sustancias mineralizantes, donde el ion cloruro suele estar acompañado de sodio en proporción semejante. La composición de este tipo de agua refleja un origen profundo. La presencia de fallas y grietas facilita su ascenso a la superficie. Se subdividen en fuertes (más de 50 g/L), medias (entre 10 y 50 g/L) y débiles (menos de 10 g/L).

### **1.1.3. Bicarbonatadas**

Aguas de baja mineralización, alcalinas y frías. Su uso es por ingesta y actúa sobre el organismo. Este tipo de aguas pueden compartir su composición con otro tipo de minerales que van a variar sus acciones. Las más comunes son: bicarbonatadas sódicas, cálcicas, mixtas, sulfatadas y cloruradas.

## **1.2. Tratamiento de aguas**

Uno de los impactos ambientales inmediatos de brindar agua para consumo humano o aprovechamiento industrial es la generación de aguas residuales o servidas. Esto se debe a que el líquido en buenas condiciones consumido por la comunidad es contaminado y luego enviado a los cuerpos receptores de agua con una calidad inferior. A medida que la cantidad de aguas residuales aumenta también incrementa el daño potencial que estas pueden causar a los cuerpos de agua.

Según datos disponibles en el sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC) en el país aproximadamente el 96% de las aguas residuales generadas por actividades domésticas o industriales no son tratadas [4]. Para el tratamiento de estas corrientes hídricas existen 3 tipos de tratamientos: primario, secundario y terciario.

### **1.2.1. Tratamiento primario**

Los sistemas primarios son los más sencillos y tienen la función de preparar el agua, limpiándola de todas aquellas partículas cuyas dimensiones pueden obstruir o dificultar los procesos consecuentes. Estos tratamientos son el cribado o las mallas de barreras, la flotación o eliminación de grasas y la sedimentación. Algunos sistemas como es el caso de la flotación y sedimentación pueden ser utilizados dentro del proceso de tratamientos secundarios y no forzosamente como un método primario aislado [5].

### **1.2.2. Tratamiento secundario**

Tiene el objetivo de limpiar el agua de aquellas impurezas cuyo tamaño es mucho menor a las que se pueden captar por la decantación y las rejillas, para ello, los sistemas se basan en métodos mecánicos y biológicos combinados. Al manejar aspectos biológicos son afectados por factores externos como son los climáticos, por lo que se tienen que estudiar sus características y adaptación al sitio del proyecto, para poder hacer una elección adecuada [5].

### **1.2.3. Tratamiento terciario**

Consiste en procesos físicos y químicos especiales con los que se consigue limpiar la corriente de agua de contaminantes concretos como fósforo, nitrógeno, minerales, metales pesados, virus, compuestos orgánicos, entre otros [8].

1.2.3.i.Arcilla. Empleadas para el tratamiento de aguas residuales se les denomina arcillas especiales y están constituidas predominantemente por un solo tipo de arcilla y sus propiedades dependen esencialmente de las características del mineral. Son capaces de adsorber diversas sustancias en el espacio interlamilar (bentonitas) o en los canales estructurales [6].

1.2.3.ii.Carbón Activado. Los carbones activos presentan una gran capacidad de adsorción de un amplio rango de contaminantes entre los que se incluyen compuestos aromáticos, hidrocarburos, detergentes, pesticidas, tintes solubles, disolventes clorados, entre otros. El carbón activo en polvo (PAC) tiene la capacidad de adsorber, retener y

ceder oxígeno en su superficie, favoreciendo una mejora en la eficiencia de la eliminación de contaminantes orgánicos por medio de la biomasa [7].

1.2.3.iii. Materiales de Desecho Agrícolas. Estos materiales de desecho agrícolas (MDA), provienen de fuentes renovables que aseguran la disponibilidad de estos. Su capacidad natural de adsorción se debe a los diferentes grupos funcionales presentes en su superficie, ya que en su mayoría están compuestos por celulosa, hemicelulosa y lignina. Su capacidad natural de retención de contaminantes puede ser incrementada mediante estímulos como modificaciones químicas, logrando materiales potenciales para procesos de adsorción e intercambio iónico.

1.2.3.iv. Osmosis inversa. es un proceso en el cual se obtiene agua de alta calidad en forma continua libre de sales, materia orgánica, coloides y organismos microbiológicos. Se logra eliminar cerca del 99% de los sólidos disueltos en el agua de entrada, esto se logra por medio de la separación de las impurezas que se van concentrando en la corriente de rechazo o concentrado. En este proceso se aplica una presión superior a la presión osmótica en la corriente de entrada para hacerla pasar a través de las membranas de osmosis inversa, las sales y demás contaminantes no pueden atravesar la membrana de manera que la corriente de agua pura sale por la corriente de permeado [9].

1.2.3.v. Electrodiálisis. Es un proceso de separación electroquímica con membrana, donde se hace pasar una corriente eléctrica continua a través de una solución iónica, los iones positivos llamados cationes migran hacia el electrodo positivo (cátodo) y los iones negativos llamados aniones llegan al electrodo negativo (ánodo). Al colocar entre ambos electrodos dos membranas semipermeables que permitan pasar selectivamente  $\text{Cl}^-$ , el agua contenida en el centro de la celda electrolítica se desionizará progresivamente, obteniendo así agua dulce [9].

1.2.3.vi. Intercambio iónico: Este proceso se basa en las propiedades que presentan ciertas sustancias insolubles capaces de intercambiar aniones o cationes cuando se ponen en contacto con un electrolito. Es usado en la desalinización de agua salobre con

altas concentraciones y no requiere de altas presiones, ni un extenso tratamiento previo o un aporte de energía térmica alto. Sin embargo, el agotamiento de la resina limita un poco la funcionalidad de este proceso al igual que los grandes volúmenes con los que las resinas se deben regenerar [9].

### **1.3. Parámetros**

#### **1.3.1. DBO**

Hace referencia a la demanda biológica de oxígeno. Es una medida de la cantidad de oxígeno utilizado por los microorganismos en la estabilización de la materia orgánica biodegradable, en condiciones aeróbicas, en un periodo de 5 días a 20°C [10].

#### **1.3.2. DQO**

La demanda química de oxígeno determina la cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica en una muestra de agua, bajo condiciones específicas de agente oxidante, temperatura y tiempo [11].

#### **1.3.3. Grasas y aceites**

Son todas aquellas sustancias de naturaleza lipídica, que al ser inmiscibles con el agua, van a permanecer en la superficie dando lugar a la aparición de natas y espumas. Estas natas y espumas entorpecen cualquier tipo de tratamiento físico o químico, por lo que deben eliminarse en los primeros pasos de tratamiento de un agua residual. Su efecto en los sistemas de tratamiento de aguas residuales o en las aguas naturales se debe a que interfieren con el intercambio de gases entre el agua y la atmósfera. No permiten el libre paso del oxígeno hacia el agua, ni la salida del dióxido de carbono del agua hacia la atmósfera [12].

#### **1.3.4. Iones cloruro**

Es uno de los aniones inorgánicos principales en el agua natural y residual. El contenido de cloruros de las aguas naturales es variable y depende principalmente de la naturaleza de los terrenos atravesados. Un contenido elevado de cloruros puede dañar las conducciones y estructuras metálicas y perjudicar el crecimiento vegetal [13].

#### **1.3.5. Iones sulfato**

Son muy abundantes en la naturaleza, se conoce que la explotación de minas conduce a un incremento de estos iones en el agua debido principalmente a los procesos de



oxidación que sufre el mineral durante su extracción. Su afectación en el ser humano en tiene que ver principalmente con el efecto laxante que surge al ingerir una alta concentración de sulfato de sodio y magnesio, además favorecen la corrosión de los metales y cambian el sabor del agua [14].

#### **1.3.6. Conductividad**

Es una medida de la capacidad del agua para transportar la corriente eléctrica. Este parámetro está relacionado con la concentración de sales en disolución, cuya disociación genera iones capaces de transportar la corriente eléctrica. La solubilidad de las sales en el agua depende de la temperatura, por lo que la conductividad varía en conformidad con la temperatura del agua [15].

#### **1.4. Marco legal**

Es preciso cumplir con los criterios establecidos para llevar a cabo el vertimiento de las aguas residuales y así garantizar la disminución en la carga contaminante del río Chicamocha. Sin embargo, para las aguas termales aún no existe normatividad específica, pero la autoridad ambiental Corpoboyacá toma como referencia la Resolución No. 0631 del 17 de marzo del 2015 para el permiso de vertimiento.

Esta fue establecida por el Ministerio De Ambiente Y Desarrollo Sostenible. En la cual se tiene en cuenta el CAPÍTULO VII. ACTIVIDADES INDUSTRIALES, COMERCIALES O DE SERVICIOS DIFERENTES A LAS CONTEMPLADAS EN LOS CAPÍTULOS V Y VI CON VERTIMIENTOS PUNTUALES A CUERPOS DE AGUA SUPERFICIALES. ARTÍCULO 15.

**Figura 1.**

*Resolución 0631 Art. 15 Parámetros fisicoquímicos*

PARÁMETRO	UNIDADES	VALORES LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES
<b>Generales</b>		
pH	Unidades de pH	6,00 a 9,00
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O <sub>2</sub>	150,00
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	mg/L O <sub>2</sub>	50,00
Sólidos Suspendedos Totales (SST)	mg/L	50,00
Sólidos Sedimentables (SSED)	ml/L	1,00
Grasas y Aceites	mg/L	10,00
Compuestos Semivolátiles Fenólicos	mg/L	Análisis y Reporte
Fenoles Totales	mg/L	0,20
Formaldehído	mg/L	Análisis y Reporte
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	mg/L	Análisis y Reporte
<b>Hidrocarburos</b>		
Hidrocarburos Totales (HTP)	mg/L	10,00
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)	mg/L	Análisis y Reporte
BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno)	mg/L	Análisis y Reporte
Compuestos Orgánicos Halogenados Adsorbibles (AOX)	mg/L	Análisis y Reporte
<b>Compuestos de Fósforo</b>		
Ortofosfatos (P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	mg/L	Análisis y Reporte
Fósforo Total (P)	mg/L	Análisis y Reporte
<b>Compuestos de Nitrógeno</b>		
Nitratos (N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	Análisis y Reporte
Nitritos (N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	mg/L	Análisis y Reporte
Nitrógeno Amoniacal (N-NH <sub>3</sub> )	mg/L	Análisis y Reporte
Nitrógeno Total (N)	mg/L	Análisis y Reporte
<b>Iones</b>		
Cianuro Total (CN <sup>-</sup> )	mg/L	0,10
Cloruros (Cl <sup>-</sup> )	mg/L	250,00

**Figura 1. Continuación**

*Resolución 0631 Art. 15 Parámetros fisicoquímicos*

PARÁMETRO	UNIDADES	VALORES LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES
Fluoruros (F <sup>-</sup> )	mg/L	5,0
Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	mg/L	250,0
Sulfuros (S <sup>2-</sup> )	mg/L	1,00
<b>Metales y Metaloides</b>		
Aluminio (Al)	mg/L	Análisis y Reporte
Antimonio (Sb)	mg/L	0,30
Arsénico (As)	mg/L	0,10
Bario (Ba)	mg/L	1,00
Berilio (Be)	mg/L	Análisis y Reporte
Boro (Bo)	mg/L	Análisis y Reporte
Cadmio (Cd)	mg/L	0,01
Cinc (Zn)	mg/L	3,00
Cobalto (Co)	mg/L	0,10
Cobre (Cu)	mg/L	1,00
Cromo (Cr)	mg/L	0,10
Estaño (Sn)	mg/L	2,00
Hierro (Fe)	mg/L	1,00
Litio (Li)	mg/L	Análisis y Reporte
Manganeso (Mn)	mg/L	Análisis y Reporte
Mercurio (Hg)	mg/L	0,002
Molibdeno (Mo)	mg/L	Análisis y Reporte
Níquel (Ni)	mg/L	0,10
Plata (Ag)	mg/L	0,20
Plomo (Pb)	mg/L	0,10
Selenio (Se)	mg/L	0,20
Titanio (Ti)	mg/L	Análisis y Reporte
Vanadio (V)	mg/L	1,00
<b>Otros Parámetros para Análisis y Reporte</b>		
Acidez Total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y Reporte
Alcalinidad Total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y Reporte
Dureza Cálcica	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y Reporte
Dureza Total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y Reporte
Color Real		
Medidas de absorbancia a las siguientes longitudes de onda: 436 nm, 525 nm y 620 nm.	m <sup>-1</sup>	Análisis y Reporte

**Nota.** En esta tabla se observan los parámetros y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas- ARnD para las actividades industriales, comerciales o de servicios diferentes a las contempladas en los capítulos V y VI con vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales, a cumplir. Tomado de Resolución 0631 de 2015 [Con fuerza de ley]. Por medio del cual se establecen los parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de ARnD. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

## **2. DESCRIPCIÓN DEL ESTADO ACTUAL DEL AGUA PROVENIENTE DE PISCINAS TERMALES DE PAIPA CON VERTIMIENTO AL RÍO CHICAMOCHA**

En este capítulo se describirá el estado actual de las piscinas termales de Paipa, sus vertimientos y la caracterización del flujo de estos, con el fin de lograr un contexto más amplio y llegar a conocer estas aguas termales desde su origen hasta sus usos.

### **2.1. Descripción de los efectos del vertimiento de aguas residuales con alto contenido de sulfatos y cloruros en afluentes naturales**

Boyacá es un Departamento ubicado en el centro de Colombia dentro de la cordillera de los Andes Oriental, lo cual le permite tener numerosos ríos que corren por el territorio boyacense conformando cinco cuencas hidrográficas que llevan sus aguas a cinco ríos de gran potencial para el país: el Magdalena, el Suárez, el Arauca, el Meta y el Chicamocha.

Uno de los ríos más importantes para el departamento es el Chicamocha, la cuenca alta de este drena aproximadamente la tercera parte de Boyacá y satisface una gran demanda de agua solicitada para consumo humano y doméstico, agrícola, pecuario, recreativo e industrial de acuerdo con el Decreto 1594 de 1984.

Estos usos se dan en los diferentes municipios, uno de ellos es la demanda para consumo humano la cual alcanza valores de  $0,72 \text{ m}^3/\text{seg}$ . Por otro lado, la demanda para riego de cultivos y pastos durante los meses de mayor requerimiento es de  $2,94 \text{ m}^3/\text{seg}$ , esto se debe a la fuerte actividad agropecuaria del departamento. Totalizando los diversos usos se alcanzan demandas de aproximadamente  $4,59 \text{ m}^3/\text{seg}$  [16].

Por lo anterior, el río Chicamocha se considera como el más importante del departamento de Boyacá, este se origina en la ciudad de Tunja inicialmente como el río Jordan y atraviesa municipio como Paipa, Duitama, Sogamosos, entre otros, para luego formar el cañón del Chicamocha. Esta corriente ingresa al departamento de Santander donde se une con los ríos Suarez y Fonce para formar finalmente el río Sogamoso [17].

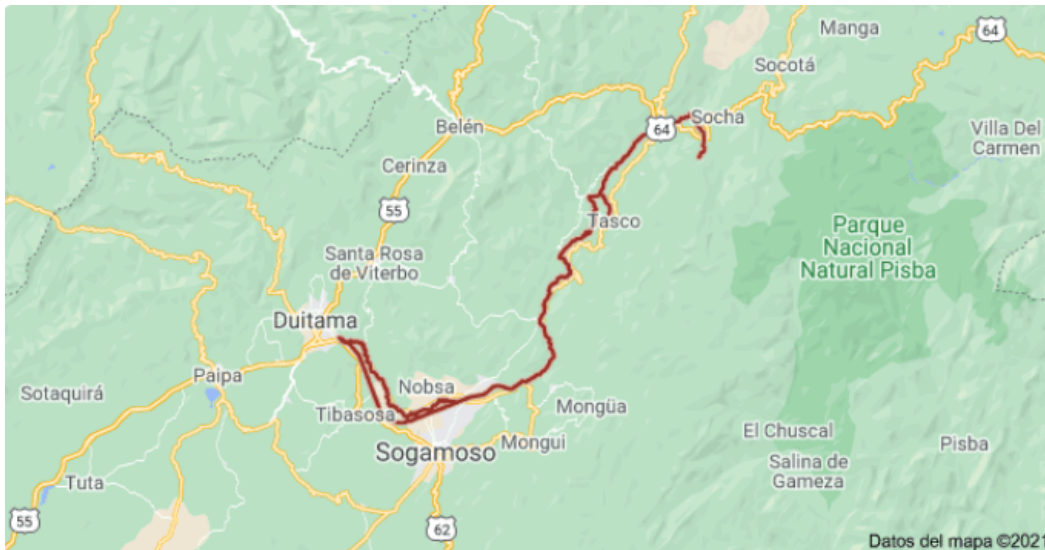
Además, forma parte de la cuenca del río Magdalena y ocupa aproximadamente 9747 km<sup>2</sup> de los departamentos de Boyacá y Santander [18].

Durante su recorrido, el río Chicamocha recibe las aguas de tipo doméstico de municipios como Tunja, Paipa, Duitama, Sogamoso, entre otros. Este recorre la zona industrial de Boyacá y recibe la contaminación que producen Acerías Paz del Río, Termo paipa, sobrantes de las aguas termales de las piscinas de Paipa, del complejo industrial de Maguncia, Metalúrgica Boyacá, Zona industrial de Sogamoso y curtiembres [19].

La contaminación de aguas por vertimientos en el río Chicamocha inicia en Tunja, se complementa con vertimientos indirectos y al pasar por Paipa, se identifica que el complejo turístico es la zona de mayor aporte en cuanto a descargas de aguas azufradas. Debido a estas descargas de aguas azufradas, la conductividad se dispara y se dificultan muchos de los usos del agua tales como su potabilización.

## Figura 2.

### Mapa Río Chicamocha



**Nota.** La figura representa el río Chicamocha en el departamento de Boyacá. Google. (s.f).[Indicaciones de Google Maps para observar la ubicación del Río Chicamocha]. [En línea]. Disponible: <https://www.google.com/maps/place/R%C3%ADo+Chicamocha/@5.8602106,-72.9915783,11z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0x8e6a2d10a519ae1f:0x796b4018c61b3b01!8m2!3d5.8544642!4d-72.8349277> [Acceso: Agosto 06,2021]

La principal razón de contaminación por vertimientos en Boyacá es por la no planificación y legislación sobre estas aguas, por lo cual es de gran importancia identificar la fuente de contaminación.

Las aguas termales de las piscinas de Paipa provienen del centro de una depresión geológica cuyo eje coincide con la cuenca alta del río Chicamocha, estas aguas han sido estudiadas a través de los años con el fin de conocer a fondo su origen y el porqué de su contaminación. Jean Baptiste Boussingault, científico francés que al llegar a Paipa (Boyacá), concluyó que el calor del agua de los manantiales provenía de uno o varios volcanes. En 1929, el padre Alfonso M. Navia y el doctor Antonio M. Barriga realizaron

un estudio sobre las aguas termo medicinales de Paipa, buscando su aprovechamiento industrial y terminan recomendando la construcción de balnearios. Más tarde la Química Claudia Alfaro continuó esta investigación desenmascarando la composición química e isotópica de estas aguas, haciendo énfasis en la geotermia, pues concluyó que estas aguas termales tienen un gran componente de origen magmático [20].

Las características de estas termales son debido a su origen magmático, pero debido a la estructura del área donde emanan, están contaminadas con aguas meteóricas las cuales aportan algunos compuestos químicos. Las evidencias tienden a demostrar que las fuentes de Paipa están formadas principalmente por aguas juveniles, las cuales traen parte de las sales presentes [21].

Las fuentes termales de Paipa están asociadas a yacimientos salinos (sulfato de sodio y cloruro de sodio), por lo que se puede atribuir esta característica a la alta conductividad térmica que presentan estas fuentes.

Debido al alto contenido de sales, estas aguas no se consideran óptimas para riego y uso agropecuario. Así mismo, el vertimiento que se realiza directamente al río Chicamocha ocasiona contaminación, pérdida de cultivos, deterioro de la cuenca y la salinización de suelos [22].

No obstante, la mejora de la calidad del agua de los vertimientos aportaría significativamente la productividad nacional, dado que Colombia se ha caracterizado por tener una agricultura que impulsa el desarrollo del país aprovechando su localización. Uno de los departamentos que más ha aportado a este sector es Boyacá que de acuerdo con el censo, en el departamento el área con cultivos permanentes es de 184.820 ha y en cultivos transitorios es de 109.359 ha [23].

Teniendo en cuenta que el cuidado del suelo es sumamente importante en los cultivos, en este departamento la actividad de riego se realiza en un gran porcentaje con aguas del río Chicamocha, el cual cuenta con vertimientos que no cumplen la normativa y si la cumpliesen, sería de gran importancia ya que se tendrían cultivos saludables, y se

evitarían costos de mal manejo de riego como el cuidado de enfermedades en los cultivos y la deficiencia de nutrientes.

El cumplimiento de la normativa de vertimientos no solo trae beneficios a los cultivos, sino también al termalismo en Colombia. El país se ha caracterizado por tener diversos recursos que representan un llamativo para la comunidad, en este caso sería reconocido como un destino de turismo de salud y bienestar a nivel mundial, como lo argumenta ProColombia, una entidad encargada de promover el Turismo, la Inversión Extranjera en Colombia y la imagen del país, en un documento donde proyecta al país como uno de los principales destinos latinoamericanos en turismo de salud.

En Colombia, las actividades del sector turismo ocupan el segundo generador de divisas, siendo superado por el sector minero-energético, y se considera que puede despertar el interés de inversionistas y empresarios extranjeros que estimularían la economía nacional [24]. Para alcanzar este objetivo debe existir una oferta innovadora como lo es el turismo de bienestar, siendo este una alternativa adicional al de salud pues crea una nueva conciencia de conservación y autocuidado, logrando un equilibrio perfecto entre el ocio y las terapias naturales. El uso de aguas minerales para la salud y la relajación es solo una parte de una gran experiencia que junto a los paisajes nuestro país genera un mayor valor a la hora de proporcionar un estado de bienestar.

Para cumplir con todas las normas a la hora de realizar esta alternativa de turismo de bienestar, no solo debe existir el permiso de vertimientos sino también la implementación de las Normas Técnicas Sectoriales de Turismo Sostenible, ya que estas son las encargadas de mantener la conservación, el patrimonio cultural y el ambiente. Adicional a esto se obtiene una certificación, la cual promociona y fortalece el sector, generando nuevos empleos, conciencia en la comunidad y prácticas empresariales más responsables [25].

Estas aguas termales generan diferentes impactos positivos en la comunidad, sin embargo, el conocimiento de estas es muy corto y cada vez más se hace necesario una investigación mucho más profunda acerca de estas. Con el fin de conocer las afectaciones de estas aguas al medio ambiente, se analizan sus conexiones con aguas



superficiales como lo es el río Chicamocha, encargado de recibir sus vertimientos. Corpoboyacá e INGFOCOL, calificaron la calidad del agua del río, según el indicador desarrollado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM.

El Índice de calidad del agua, ICA, el cual es un valor numérico que califica en una de cinco categorías, la calidad del agua de una corriente superficial, fue el indicador encargado de sintetizar el análisis situacional de la corriente principal de la cuenca alta y media del Río Chicamocha.

**Tabla 1.**

*Calificación de calidad del agua según los valores tomados del ICA*

<b>Categorías de valores que puede tomar el indicador</b>	<b>Calificación de la calidad del agua</b>	<b>Señal de alerta</b>
<b>0.00-0.25</b>	Muy Mala	Rojo
<b>0.26-0.50</b>	Mala	Naranja
<b>0.51-0.70</b>	Regular	Amarillo
<b>0.71-0.90</b>	Aceptable	Verde
<b>0.91-1.00</b>	Buena	Azul

**Nota.** Esta tabla contiene las categorías en las cuales pueden ser calificadas las aguas superficiales según su calidad. Tomado de IDEAM, “Calificación de calidad del agua” Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. [En Línea]. Disponible: <http://www.ideam.gov.co>

En el diagnóstico realizado por Corpoboyacá en colaboración con INGFOCOL para el plan de ordenamiento hídrico del río Chicamocha se obtuvieron los siguientes resultados:

**Figura 3.**

*Índice de calidad de Aguas- ICA, en algunas estaciones del Río Chicamocha*

Estación	I <sub>OD</sub>	I <sub>SS</sub>	I <sub>DQO</sub>	I <sub>CE</sub>	I <sub>NT/PT</sub>	I <sub>pH</sub>	ICA	Calidad
Aguas Arriba Tunja	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Río Jordán	0.01	0.89	0.13	1.00	0.60	1.00	0.60	Regular
Arboleda	0.01	0.91	0.13	1.00	0.15	1.00	0.52	Regular
Oicatá	0.16	0.27	0.13	1.00	0.60	1.00	0.52	Regular
Combita	0.01	0.65	0.13	1.00	0.35	1.00	0.51	Regular
Playa Arriba	0.01	0.85	0.13	1.00	0.35	1.00	0.55	Regular
Playa Abajo	0.01	0.88	0.13	1.00	0.15	1.00	0.52	Regular
Tuta	0.20	0.98	0.91	1.00	0.15	1.00	0.70	Regular
Bosiga	0.18	0.82	0.91	1.00	0.60	0.68	0.70	Regular
La Reforma	0.42	0.96	0.91	1.00	0.60	1.00	0.81	Aceptable
Arriba Termo Paipa	0.61	0.93	0.26	1.00	0.35	0.69	0.64	Regular
Laguna Termo Paipa	0.43	0.92	0.26	1.00	0.60	1.03	0.70	Regular
La Siberia	0.32	0.83	0.51	1.00	0.15	1.00	0.63	Regular
El Paraíso	0.36	0.94	0.91	1.00	0.80	1.00	0.83	Aceptable
San Rafael	0.46	0.92	0.51	1.00	0.60	1.00	0.74	Aceptable
Punta Larga	0.72	0.88	0.91	1.00	0.15	0.66	0.72	Aceptable
Los Cámbulos	0.46	0.86	0.26	1.00	0.15	1.39	0.67	Regular
Puente Chámeza	0.52	0.86	0.13	1.00	0.15	1.00	0.60	Regular
Nazareth	0.01	0.00	0.13	1.00	0.15	1.00	0.37	Mala
Vado Castro	0.01	0.82	0.13	1.00	0.80	1.00	0.62	Regular
La Turca	0.42	0.00	0.13	1.00	0.15	1.00	0.44	Mala
Corrales	0.34	0.90	0.13	1.00	0.15	1.00	0.58	Regular

**Nota.** En esta tabla se observan algunas estaciones del recorrido del río Chicamocha, algunos índices y su calidad. Tomado de IDEAM e INGFOCOL, “Índice de calidad de agua en diferentes estaciones del río Chicamocha” 2015. [En Línea]. Disponible: <http://www.ideam.gov.co>

«El indicador se puede calcular con un diferente conjunto de variables medidas, cuya cantidad y tipo depende de la disponibilidad de datos y de las diferentes presiones contaminantes a las cuales están sometidos los distintos cuerpos de agua. Para el caso colombiano, se han medido desde 2005, en las corrientes superficiales, un conjunto de cinco variables: oxígeno disuelto, sólidos suspendidos totales, demanda química de oxígeno, conductividad eléctrica y potencial de hidrógeno. A partir de 2009, en las estaciones de la Red se ha medido adicionalmente nitrógeno total y fósforo total.» [26]

### **Ecuación 1**

*Fórmula para el Índice de calidad de aguas-ICA*

$$ICA_{njt} = \left( \sum_{i=1}^n W_i \cdot I_{ikjt} \right)$$

**Nota.** En esta ecuación se muestra la fórmula de cálculo del indicador. Tomado de IDEAM, “ICA”.

[En Línea]. Disponible: <http://www.ideam.gov.co>

Donde:

*ICAnjt*: Es el Índice de Calidad del Agua de una determinada corriente superficial en la estación de monitoreo de la calidad del agua j en el tiempo t, evaluado con base en n variables.

*Wi*: Es el ponderador o peso relativo asignado a la variable de calidad i.

*Iikjt*: Es el valor calculado de la variable i (obtenido de aplicar la curva funcional o ecuación correspondiente), en la estación de monitoreo j, registrado durante la medición realizada k, del período de tiempo t.

$n$ : Es el número de variables de calidad involucradas en el cálculo del indicador;  $n$  es igual a 5 o 6 dependiendo de la medición del ICA que se seleccione.

Estos resultados son de gran importancia para los procesos de planificación que realizan las autoridades ambientales de nuestro país para la contribución del control de la contaminación ambiental y el uso eficiente del recurso hídrico superficial.

En este caso, el plan de ordenamiento de recurso hídrico, PORH, se plantea articulado con estos instrumentos de planificación:

- Decreto 1729 de 2002, “Restablecer y mantener un adecuado equilibrio entre la oferta de bienes y servicios ambientales y el aprovechamiento socioeconómico en la Cuenca alta del río Chicamocha, mediante la gestión tendiente a la conservación, restauración, recuperación y uso sostenible de la estructura biofísica y en especial del recurso hídrico” [17].
- En el año 2009, CORPOBOYACA, planteó como objetivo general: “Preservar, conservar, restaurar, y usar la riqueza de la oferta ambiental de los diferentes ecosistemas existentes en la Cuenca Media del Río Chicamocha (CMRCH), en forma sostenible, garantizando el mejoramiento permanente y continuo del estado de bienestar de las comunidades asentadas en el territorio de la misma” [17].
- Convenio 026 de 2006 entre CORPOBOYACÁ y UNIBOYACÁ, Resolución 0337 de 2007 "Por la cual se aprueba y adopta el Plan de Ordenación y manejo ambiental de la Cuenca alta del río Chicamocha y se toman otras determinaciones", en la que destacan de manera particular: El desarrollo del Programa "Manejo Integral del Recurso Hídrico" (Artículo 4, Resolución 337 de 2007). El establecimiento de los objetivos de calidad para la cuenca alta (Artículo 5, Resolución 337 de 2007) [17].

La corporación Corpoboyacá ha sido el interventor para garantizar las condiciones de calidad y cantidad requeridas para sostenimiento de los ecosistemas acuáticos y los usos actuales y potenciales del río Chicamocha, todo esto por la Resolución 0631 de 2015, por la cual se establecieron parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.

Como se dijo anteriormente uno de los vertimientos que causa contaminación al río Chicamocha son las aguas termales, estas no presentan ningún tipo de norma que restrinja su calidad sin embargo la resolución 0631 de 2015 se asemeja como normativa para aguas termo minerales.

**Tabla 2.**

*Resultados fisicoquímicos del año 2019*

<b>Parámetros</b>	<b>Resolución 0631/2015</b>	<b>Pozo Azul</b>	<b>Ducto de salida piscinas</b>
<b>Temperatura (°C)</b>	<40	41.4	19.7-37.6
<b>pH</b>	6.0-9.0	6.9	6.94-8.94
<b>Sulfatos (mg SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>/L)</b>	250	626	609
<b>Cloruros (mg CL<sup>-</sup>/L)</b>	250	5209	5261

**Nota.** Esta tabla muestra los resultados de algunos parámetros fisicoquímicos en el pozo azul, el ducto de salida de las piscinas y la normativa establecida por la resolución 0631 de 2015. Tomado de M. A. Cely Vargas and P. V. Acevedo Buitrago, “Propuesta para la disminución de contaminantes en las aguas residuales provenientes de las piscinas termales del instituto de turismo de paipa.” Fundación Universidad de América, 2020.

Se evidencia que los parámetros que representan una mayor afectación en el vertimiento son los Sulfatos y Cloruros, logrando sobrepasar la normativa en un 243,6% y 2104,4% respectivamente. Estas sales al encontrarse en solución se tratan como iones.

El ion cloruro, es uno de los iones inorgánicos que es posible encontrar en mayor cantidad tanto en aguas naturales como residuales y residuales tratadas. Sin embargo, un contenido muy elevado de este compuesto puede representar complicaciones al momento de utilizar la corriente de agua para consumo humano, agricultura, industria, entre otros. Este factor suele ser un indicador de la presencia de contaminación de carácter microbiológico patógeno, además, es altamente corrosivo y puede dar lugar a deterioros y picaduras en tuberías y sistemas de distribución de agua [27].

Como se mencionaba anteriormente, los usuarios agrícolas se ven afectados por la salinidad en el suministro de agua, que puede reducir el rendimiento de los cultivos y aumentar los costos de la gestión que se debe adelantar para el control de este problema. Por otro lado, las descargas de agua de drenaje superficial y subterráneo pueden degradar la potabilidad del agua [28].

En cuanto a los iones sulfato, también se encuentran comúnmente en fuentes naturales de agua, pero si se supera una concentración de 250 mg/L representa un riesgo para la salud del consumidor, ya que tiene un efecto laxante y puede causar deshidratación. Así mismo, en concentraciones superiores a 200 mg/L favorecen la corrosión de los metales lo que incrementa la cantidad de plomo disuelto proveniente de las tuberías y cambian el sabor del agua [4].

Por otro lado, la presencia de sulfato en las aguas superficiales puede conducir a la formación de suelos ácidos sulfatados en algunos humedales. La formación de este tipo de suelos ácidos sulfatados depende de: la concentración de sulfatos en el agua superficial, cantidad de carbón biodisponible y cantidad de tiempo que el sulfato está en contacto con la zona anaeróbica en los sedimentos [29].

Otra problemática que se presenta por la presencia de estos iones en el agua potable está relacionada con afectaciones en la salud de la población que se ve expuesta a estas fuentes hídricas. De acuerdo con informes, la diarrea puede estar asociada con la ingestión de agua que contiene altos niveles de sulfato, el riesgo de los efectos laxantes se dan cuando se experimenta un cambio abrupto de concentraciones bajas a concentraciones altas de sulfatos en el agua potable [14].

El uso doméstico y la seguridad del agua potable es una consideración primordial para la mayoría de las naciones y para el público en general. Los suministros de agua potable pueden verse afectados por los niveles de sedimentos, nutrientes, microorganismos, sales totales, sulfatos, cloruros y pesticidas. Por lo tanto, es de gran importancia cumplir con la normativa que se encarga de reglamentar los diferentes usos del agua en Colombia:

- Decreto 1541 de 1978. Este decreto tiene por finalidad reglamentar las normas relacionadas con el recurso agua en todos sus estados, este reglamenta los usos de las aguas no marítimas [30]. Comprende aspectos como dominio, reglamentación, ocupación, declaración, conservación, régimen al que están sometidas ciertas categorías, restricciones y limitaciones de aguas no marítimas asegurando el aprovechamiento de esta por todos, el desarrollo humano económico y social.
- Decreto 1594 de 1984. Se encarga de reglamentar los usos del agua y residuos líquidos [31]. Específicamente el ordenamiento del recurso, la destinación genérica de las aguas superficiales, subterráneas, marítimas, estuarias y servidas, los criterios de calidad para destinación del recurso, vertimiento de los residuos líquidos, normas de vertimiento, registros de los vertimientos, obtención de los permisos de vertimiento y de los planes de cumplimiento para usuarios externos, modificación de normas de vertimiento y criterios de calidad.
- Decreto 3100 de 2003. En este decreto se reglamentan las tasas retributivas por la utilización directa del agua como receptor de los vertimientos puntuales [32].
- Decreto 1575 de 2007. Por el cual se establece el Sistema para la Protección y control de la Calidad Agua para consumo humano, con el fin de monitorear, prevenir y controlar los riesgos para la salud humana causados por su consumo, exceptuando el agua envasada [33].
- Decreto 1324 de 2007. Por el cual se crea el Registro de Usuarios del Recurso Hídrico, con el fin de realizar el inventario de las personas naturales y jurídicas que usan y aprovechan el recurso hídrico en las cuencas priorizadas [34].

- Decreto 1323 de 2007. Por el cual se crea el Sistema de Información del Recurso Hídrico (SIRH), con el cual se integra y estandariza el acopio, registro, manejo y consulta de datos, bases de datos, estadísticas, sistemas, modelos, información documental y bibliográfica, reglamentos y protocolos que facilita la gestión integral del recurso hídrico [35].
- Decreto 3930 de 2010. Establece las disposiciones relacionadas con los usos del recurso hídrico, el Ordenamiento del Recurso Hídrico y los vertimientos al recurso hídrico, al suelo y al alcantarillado [36].

## **2.2. Caracterización del flujo de vertimiento de aguas termales en el sector turístico**

Las piscinas termales de un complejo turístico en Paipa se abastecen del pozo azul, una fuente natural de aguas termo-minerales, y una vez cumplen con un tiempo de uso se vierten en una fuente natural. Sin embargo, esta corriente de vertimiento se considera como agua residual.

Las aguas residuales generadas por acción del ser humano o de origen industrial cuentan con ciertas características que pueden afectar las condiciones propias de las masas receptoras como ríos, lagos, mares, entre otras, que son incapaces de absorber y neutralizar por sí mismos la carga contaminante de dicha corriente. Por esta razón, estos cuerpos de agua receptores han venido perdiendo sus condiciones naturales de apariencia física y su capacidad de sustentar una vida acuática adecuada, además, pierden las condiciones mínimas para su aprovechamiento como fuentes de abastecimiento de agua, como vías de transporte o fuentes de energía [37].

Al momento de llevar a cabo el vertimiento en el río Chicamocha es de gran importancia tener en cuenta las características físico químicas de la corriente residual, ya que por su naturaleza y el uso que se le da en el complejo turístico puede generar cambios en el cuerpo de agua receptor que afecten su buen desarrollo, además de interferir en las actividades de las poblaciones aledañas que utilizan este río para proveerse del recurso hídrico.



Los resultados de las caracterizaciones que se llevan a cabo para determinar el contenido de iones, minerales, entre otros componentes, pueden variar debido a la naturaleza del agua, por lo que es posible que, en comparación con estudios realizados en años anteriores, se presenten cambios en los valores reportados.

Para el desarrollo de este proyecto se tendrán en cuenta los resultados del estudio realizado el 22 y 23 de marzo del 2020. dos en la piscina olímpica. Pozo azul y piscina olímpica con agua sin tratar, en el cual se determinó que la concentración de iones sulfatos y cloruros tanto en los ductos de salida de las piscinas como en pozo azul superan los valores establecidos en la resolución 0631 del año 2015 como se muestra en la Tabla 2. Se tiene en cuenta aque para esta época aun se manejaba con la capacidad total del instituto.

Teniendo en cuenta los resultados presentados, es de gran importancia la implementación de una alternativa de tratamiento que permita disminuir las cantidades de cloruros y sulfatos presentes en la corriente residual para cumplir con la normativa establecida por entidades reguladoras como Corpoboyacá y evitar posibles sanciones e incluso suspensión de actividades en el complejo turístico.

Otro factor de importancia para tener en cuenta es que, una vez terminan las actividades en el complejo turístico, las piscinas dispuestas para la recreación de los visitantes bajan su nivel a la mitad con el fin de homogeneizar la temperatura al completar el volumen restante con una corriente proveniente del pozo azul.

### **2.3. Contexto del municipio de Paipa**

El municipio de Paipa está localizado en el valle de Sogamoso en la parte central-oriental del país y noroccidental del departamento de Boyacá a 2525 metros sobre el nivel del mar. Su cabecera municipal se encuentra a los 5°47' de latitud norte y 73°06' de longitud oeste y posee una extensión de 305,9 Km<sup>2</sup>.

La totalidad del municipio pertenece a la provincia fisiográfica de la cordillera oriental y su territorio se ha dividido en dos unidades climáticas. Esta división se hizo teniendo en cuenta la base topográfica disponible con el fin de determinar las costas máximas y

mínimas, así como los pisos térmicos latitudinales allí presentes. La cota menor, correspondiente a los 2200 metros sobre el nivel del mar se localizó en la vereda El Venado y en los alrededores del corregimiento de Palermo, a su vez, la máxima cota de 3500 metros se ubicó en la cuchilla Cerro Las Cruces. Lo descrito anteriormente demuestra que la mayor parte del municipio se sitúa entre 2200 y 3000 metros que según la denominada clasificación Caldas, es el piso térmico frío y solo un pequeño sector correspondiente a las veredas Rincón de Españoles y Medios se elevan entre los 3000 y 3500 metros sobre el nivel del mar determinando el piso altitudinal muy frío [38].

«El promedio de lluvia total anual es de 881 mm. Los meses de diciembre, enero, febrero, julio y agosto son predominantemente secos. Las temporadas de lluvia se extienden desde finales de marzo hasta principios de junio y desde finales de septiembre hasta noviembre. En los meses secos de principios de año llueve de 4 a 6 días/mes; sin embargo, en los meses secos de mitad de año llueve en promedio 17 días/mes; en los meses de mayores lluvias puede llover entre 18 y 20 días/mes. La temperatura promedio es de 13,7 °C. Al medio día la temperatura media oscila entre 20 y 22 °C. En la madrugada la temperatura mínima está entre 6 y 8 °C, aunque en la temporada seca de inicio de año, las temperaturas pueden bajar a menos de 5°C en las madrugadas. El sol brilla cerca de 4 horas diarias en los meses lluviosos, pero en los meses secos de principio de año la insolación llega a 6 horas diarias. La humedad relativa del aire es cercana al 70% en la época seca y en épocas lluviosas alcanza el 78%.»[39]

Las precipitaciones que se presentan en la región pueden afectar la concentración de los iones que se registran al momento de tomar las muestras. En el territorio colombiano, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) se encarga del programa nacional de caracterización del agua lluvia. “El comportamiento de las características químicas del agua lluvia se determina a partir del seguimiento del pH, conductividad, nitratos y sulfatos, producto del análisis químico de las muestras recolectadas en los sitios de monitoreo del IDEAM, en las principales ciudades del país y en algunas ciudades intermedias. Los sitios analizados fueron escogidos teniendo en cuenta la representatividad y confiabilidad de los datos. Para cada sitio se muestran las

gráficas correspondientes al pH y la conductividad y no se muestran las de nitratos y sulfatos ya que la conductividad representa el comportamiento de estos dos indicadores. La conductividad al ser un indicador significativo del contenido de nitratos y sulfatos, resulta ser contrario al comportamiento del pH. De esta manera, a medida que la conductividad aumenta (el contenido de nitratos y sulfatos) el pH disminuye” [40]. Sin embargo, no se cuenta con datos específicos para el municipio de Paipa, ya que no cuenta con el sistema de monitoreo establecidos por esta agencia de gobierno.

Colombia es un territorio que cuenta con una gran diversidad de complejos turísticos que ofrecen diferentes tipos de actividades recreativas para sus visitantes, pero también se cuenta con espacios que ofrecen beneficios como las aguas termales que surgen por la presencia de volcanes. Sin embargo, es importante tener en cuenta que no todas las aguas termales comparten las mismas características físico-químicas, pues esto depende también de las condiciones en que se generan, por lo que resulta conveniente llevar a cabo una pequeña descripción de estas fuentes hídricas.

El sistema hidrotermal que se genera por la actividad del volcán Cerro Machín, ubicado sobre la cordillera central de los Andes Colombianos, es considerado como un recurso geotérmico con potencial económico y fuente de desarrollo social para la región. Para la descripción de este recurso se tienen en cuenta los datos químicos proporcionados por el Inventario Nacional de Manantiales Termales de Colombia del Servicio Geológico Colombiano del año 2004 y seleccionados en un radio de 3-4 Km desde el cráter del volcán.

Por medio del uso de un diagrama triangular de Piper y el diagrama de Schoeller-Berkaloff fue posible determinar que estas aguas presentan principalmente contenido catiónico con características salinas típicas de campos geotérmicos asociados a altos contenidos de metales alcalinos (Na), clasificados como bicarbonatadas sódicas con tendencia a mixtas. Además, cuentan con un pH alcalino entre 6.98 y 7.34 y una temperatura promedio de 73.24°C.

Por otro lado, según el diagrama ternario de Giggenbach, se establece que las fuentes se agrupan dentro de las aguas ricas en magnesio, elemento soluble a bajas

temperaturas y que las fuentes se encuentran en una zona de aguas inmaduras que no han alcanzado el equilibrio químico [41].

**Figura 4.**

*Ubicación del volcán Cerro Machín*



**Nota.** La figura representa la ubicación del Volcán Cerro Machín. Tomado de Google. (s.f).[Indicaciones de Google Maps para observar la ubicación del volcán Cerro Machín]. [En línea]. Disponible: <https://www.google.com/maps/place/Cerro+Mach%C3%ADn/@4.6778882,-75.6108787,10z/data=!4m5!3m4!1s0x8e38e910196dd169:0x651c6c32b2971ffc!8m2!3d4.483333!4d-75.391667> [Acceso: Agosto 06,2021]

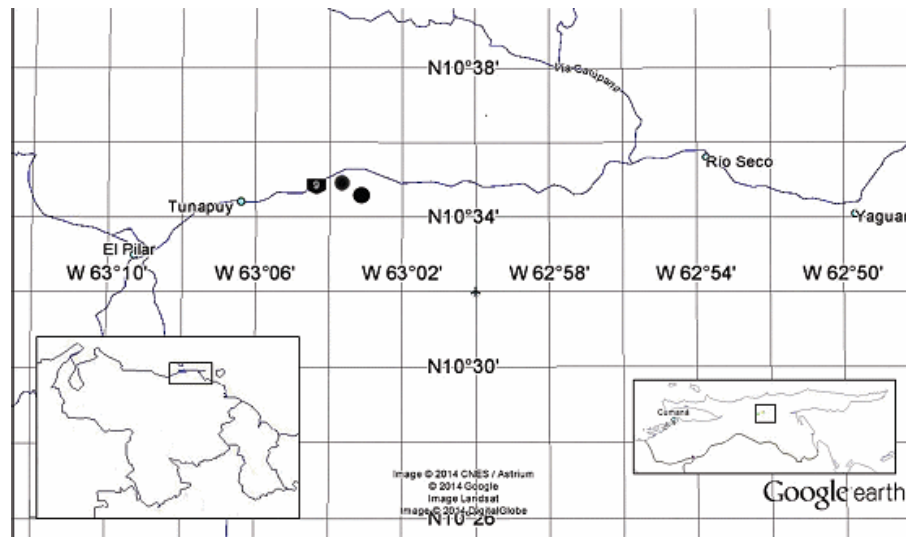
Otro punto de referencia fuera del territorio colombiano son las aguas termales del municipio libertador del Estado Sucre en Venezuela donde se llevó a cabo una caracterización que arrojó como resultado que estas aguas termales cuentan con una temperatura de entre 33,7 y 57,5 °C, estas variaciones pueden estar relacionadas a la

influencia de la mezcla con aguas de precipitación infiltradas o con aguas más frías procedentes de áreas superiores. En cuanto al pH, se registraron valores que oscilan entre 6,07 y 6,49 en consecuencia de los equilibrios que se establecen por la presencia de ácido sulfúrico.

En cuanto a los iones que se encuentran en esta fuente hídrica predomina la presencia de cationes como  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y de aniones como  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{HCO}_3^-$  por lo que se clasifican como aguas cloruradas sódicas. Por otro lado, por medio de un diagrama de Gibbs se establece que estos termales poseen una tendencia hacia la evaporación y cristalización, en este caso la evaporación favorece la presencia de isótopos pesados que permanecen en el acuífero y están relacionados con lluvias recientes o cualquier fenómeno atmosférico natural [42].

## Figura 5.

Coordenadas de la zona de estudio

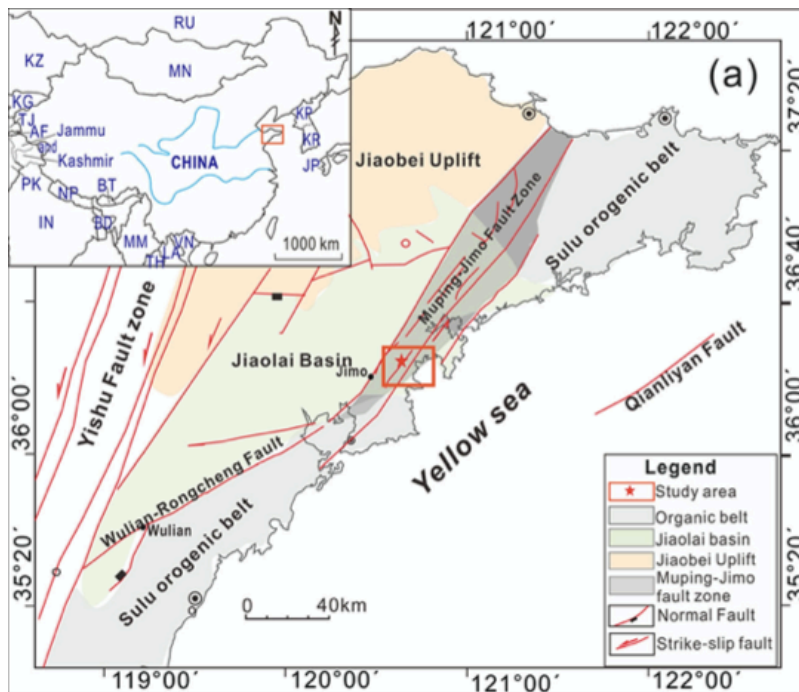


**Nota.** La figura muestra las coordenadas de la zona de estudio para las termas del Estado Sucre, Venezuela. Tomado de: J. L. Benítez, M. B. Mostue, and M. López, “Estudio Físicoquímico E Isotópico De Aguas Termales Del Municipio Libertador del Estado Sucre, Venezuela,” *Univ. Oriente, Venez.*, vol. 27, no. Universidad de Oriente, Núcleo de Sucre, Escuela de Ciencias, Departamento de Química, Cumaná, Venezuela, pp. 94–101, 2015.

Para un tercer caso de referencia se tiene en cuenta la fuente termal de Jimo en la península de Shandog, China. Estas aguas son de gran importancia en el territorio debido a su uso como fuente de energía limpia y se espera que estos contribuyan con la disminución de la presión impuesta por la escasez de recursos y los desafíos ambientales que enfrenta este país. Por medio de un proceso de espectroscopia de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente se llevó a cabo el análisis de los principales cationes presentes (K, Na, Ca y Mg), así como de elementos traza (Br, I, Sr, Li, B, Fe, Al, Si). Para este caso, las composiciones isotópicas registradas de O y H facilitaron la identificación del origen de este cuerpo hídrico y su evolución [43].

**Figura 6.**

*Mapa tectónico de la península de Shandong, China*



**Nota.** La figura muestra el mapa tectónico de la península de Shandong en China, especificando el área de estudio. Tomado de: Y. Hao *et al.*, “Chemical and isotopic constraints on the origin of saline waters from a hot spring in the eastern coastal area of China,” *Hydrogeol. J.*, vol. 28, no. 7, pp. 2457–2475, 2020, doi: 10.1007/s10040-020-02199-7.

A continuación, con el fin de llevar a cabo una comparación entre los casos que se tienen en cuenta de otras fuentes termales, se presentan los resultados obtenidos en cada investigación de la concentración de iones sulfatos y cloruro que son el punto central en el desarrollo de este trabajo, así como también características como temperatura y pH de los acuíferos.

**Tabla 3.**

*Comparación entre diferentes aguas termales del mundo con 4 variables*

Fuente	T (°C)	pH	Cl <sup>-</sup> (mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)
Termales de Paipa[44]	19,7 - 37,6	6,94 - 8,94	5261	609
Termales del municipio libertador del estado Sucre, Venezuela[42]	46	6,28	1648	1145
Termales Volcán Cerro Machín[45]	37,88	6,63	146	79,78
Fuente termal de Jimo[43]	86,38	7,05	5362,5	165

**Nota.** En esta tabla se establece una comparación entre 4 aguas termales del mundo, teniendo en cuenta parámetros como pH, Temperatura y concentración de cloruros y sulfatos.

Es posible, teniendo en cuenta los datos presentados en la tabla 3, tomar como referente los termales relacionados con el Volcán Cerro Machín, que a pesar de presentar valores distantes a los obtenidos para los termales de paipa, cuenta con 17 puntos de medición con valores variables de concentración de iones cloruros y sulfatos. Además, se describe la metodología de caracterización de forma mas completa, en la que se tienen en cuenta los siguientes puntos:

1. Compilación de información.
2. Conformación de grupos manantiales, repartidos en 9 grupos de acuerdo a su distribución espacial
3. Clasificación en función de su temperatura y de la composición relativa de aniones dominantes y cationes mayores.



4. Cálculo de la composición relativa de K-Mg para establecer madurez, procesos de dilución y estimar temperatura.
5. Cálculo de la composición relativa de las especies conservativas para formular el origen de la fuente que alimenta los manantiales termales.
6. Cálculo de la composición relativa Cl-B-HCO<sub>3</sub> con el fin de visualizar la incursión de aguas bicarbonatadas.
7. Estimación de parámetros térmicos por medio del cálculo de geotermómetros alcalinos, geotermómetro de cuarzo con máxima pérdida de vapor y geotermómetro de cuarzo sin pérdida de vapor.
8. Modelo de mezcla aplicando modelos de mezcla entalpía-sílice y entalpía-cloruros para verificar posibles procesos que el fluido geotérmico sufre en su ascenso como dilución, ebullición, entre otros.
9. Recomendaciones de usos potenciales directos e indirectos.
10. Recomendación de posibles aplicaciones de las aguas termales en termalismo.

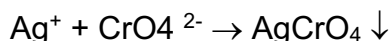
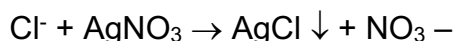
Primeramente, se considera de gran importancia geotérmica por su elevada relación H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> típica de gases calientes, temperatura de emergencia de los manantiales de hasta 94°C y las temperaturas que se estiman para los reservorios de 180°C. Estas aguas se clasificaron en el grupo 9 de estudio, compuestas por 17 manantiales bicarbonatados, ubicados en cercanías a la caldera del volcán Cerro Machín.

De acuerdo con su caracterización química, cuentan con concentraciones relativamente elevadas de compuestos como cloruro, litio y boro. Por la temperatura que alcanzan (94°C), se planteó que son una mezcla de dos acuíferos, uno profundo y caliente de agua clorurada originada en el reservorio geotérmico y uno menos profundo formado por agua subterránea. En cuanto a iones cloruro, el valor más representativo se encuentra en el manantial río San Juan (punto 4) con 496 mg, donde además pueden estar presentes otras especies iónicas, que pueden llegar a incrementar su salinidad [45].

#### 2.4. Descripción de la campaña de muestro en un instituto termal de Paipa

Se realizó una campaña de muestreo con el fin de evaluar el estado de las aguas residuales de las piscinas termales de Paipa. La recolección de muestras se hizo de acuerdo a los objetivos del proyecto, con el propósito de obtener una parte representativa del material bajo estudio. El volumen de agua captado, que para este caso corresponde a 500 ml para cada muestra, fue almacenado a 4°C para su conservación. Posteriormente, las muestras se trasladaron hasta el laboratorio Biopolab el cual cuenta con acreditación por el IDEAM bajo la resolución de 0196 del 9 de marzo de 2021, allí se llevaron a cabo los análisis respectivos, con el objetivo de determinar la concentración de iones cloruros por el método de Argentometría (SM 4500-Cl-B) y sulfatos por el método de Turbidimetría (SM 4500 SO42-E).

El ion cloruro es un anión inorgánico que se encuentra principalmente en aguas naturales y residuales, este se evidencia como un típico indicador de contaminación residual doméstica vertida a un cauce natural. Para la determinación de cloruros se utilizó el método argentométrico, ya que es aplicable en todo tipo de aguas, este método se realiza mediante una volumetría de precipitación en medio neutro o ligeramente alcalino donde precipita el cloruro de plata cuantitativamente. Se usa cromato potásico como indicador, el cual forma cromato de plata color rojo tras la total precipitación del cloruro de plata. La reacción que se produce es la siguiente [46]:



Los resultados de este parámetro se emiten por la siguiente ecuación:

## **Ecuación 2.**

*Fórmula para el cálculo de cloruros*

$$\text{mg Cl}^-/\text{L} = [ (A - B) \times N \times 35.45 \times 1000 ] / \text{mL de muestra}$$

**Nota.** En esta ecuación se muestra la fórmula para calcular los mg/L de cloruros presentes en una muestra de agua. Tomado de APHA-AWWA-WEF (2005) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21th Edition. New York, 4-70 y 4-71, método 4500-Cl- B..

Donde:

A= ml de nitrato de plata gastados en la muestra

B= ml de nitrato de plata gastados en el blanco

N= normalidad del nitrato de plata

En cuanto al ion sulfato, este es una sal soluble que se encuentra repartida en todas las aguas y normalmente algunas de sus cantidades provienen de oxidaciones bacterianas de sulfuros. Para la determinación de sulfatos se utilizó el método turbidimétrico, pues es un método aplicable a aguas potables, lluvia, superficiales y efluentes domésticos e industriales. Este se basa sobre la medida de la turbidez producida por la reacción de precipitación del ion sulfato, con una sal bárica en medio ácido a una longitud de onda de 450 nm. Para conseguir que el sulfato de bario se mantenga en suspensión, se utiliza una disolución acondicionadora que contiene glicerina y alcohol, de forma que se modifica la viscosidad de la muestra, permitiendo así una turbidez estable en un período de tiempo suficiente para medir la turbidez [47].

Los resultados de este parámetro se emiten por la siguiente ecuación:

### **Ecuación 3.**

*Fórmula para el cálculo de sulfatos*

$$\text{mgSO}_4/\text{L} = (((\text{NTUf} - \text{NTUi}) - \text{Intercepto}) / \text{Pendiente de la curva}) * \text{FD}$$

**Nota.** En esta ecuación se muestra la fórmula para calcular los mg/L de sulfatos presentes en una muestra de agua. Tomado de IDEAM.

Donde:

NTUf = Turbiedad final

NTUi = Turbiedad inicial

Intercepto: Intercepto con el eje de las ordenadas

FD = Factor de Dilución

En la campaña de muestreo se realizaron muestras puntuales las cuales representan, la composición del agua residual de las termas de Paipa para tiempo y circunstancias particulares en las que se llevaron a cabo las captaciones, teniendo en cuenta que el sitio de captación tiene una composición relativamente constante. Se inicio con la captación de las muestras, donde se tuvieron en cuenta las siguientes recomendaciones generales al momento de tomar las muestras:

1. Envases de polietileno limpios, secos y rotulados indicando número o nombre de la muestra, fecha y hora.
2. Muestreo con intervalos de tiempo de 2 horas, iniciando a las 8 de la mañana y terminando a las 6 de la tarde.

**Figura 7.**

*Canal de Vargas del Instituto Termal de Paipa*



**Nota.** En esta imagen se muestra el canal de vertimientos de aguas residuales de todas las piscinas pertenecientes al ITP, por su nombre Canal de Vargas.

Adicional a las recomendaciones generales, durante la captación se tuvieron en cuenta características de la corriente de vertimientos termales, como lo es su flujo el cual tuvo un comportamiento de carácter tranquilo, considerando que el complejo turístico actualmente disminuyó su capacidad diaria en un 70% y en el sitio no se confirmó ninguna perturbación de carácter natural o antropogénico, sin embargo, se observó lo siguiente:

- La tubería de descarga se encuentra deteriorada y gravemente afectada en su superficie de manera que esto podría hacer cambios en las fluctuaciones de la corriente de salida. Esto puede ser por una alta concentración de iones cloruros los cuales se caracterizan por ser altamente corrosivos, dar lugar a deterioros y crear picaduras en tuberías.
- Por otro lado, considerando la naturaleza de las aguas termo minerales, es importante tener en cuenta que presentan gran diversidad de microorganismos característicos del tipo de agua. La presencia de estos depende de las propiedades fisicoquímicas del agua, como temperatura, pH y composición. Suelen predominar bacterias heterótrofas oligotróficas y pueden encontrarse en menor número microorganismos autótrofos [48].

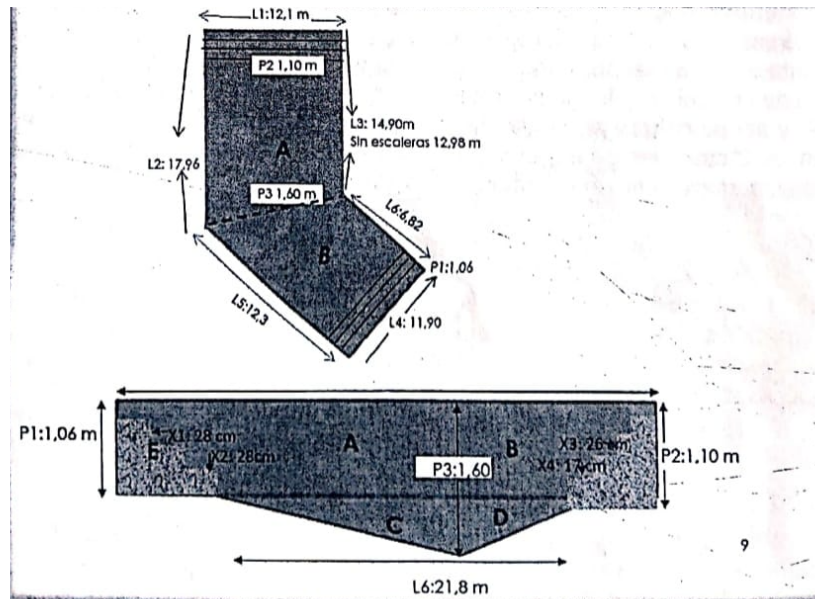
A pesar de que la temperatura de las piscinas termales del instituto turístico se adecua para su uso, algunos microorganismos provenientes del pozo azul, de donde se abastece el agua termo mineral, pueden prevalecer y estar presentes en las corrientes de descarga, a pesar del cambio que se da en las condiciones del medio. Por otro lado, la presencia de microorganismos también se debe a la contribución por parte de los bañistas que, al momento de entrar en contacto con el agua, estos microorganismos se transfieren y persisten en los cuerpos de agua. Al no contar con información específica de estudios microbiológicos para estas aguas termales en Paipa, es posible considerar estudios realizados en otros cuerpos de agua con características similares, donde se identificaron especies de *Bacillus spp*, *Staphylococcus spp*, *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Citrobacter freundii*, *Enterobacter gergoviae*, *Budivicia aquatica*, *Cedecea davisae*, *Shewanella putrefaciens* y *Edwardsiella ictaluri*. Sin embargo, no se presentan bacterias indicadoras de contaminación fecal o microorganismos patógenos que afecten las condiciones del agua [49].

En continuidad con las recomendaciones y parámetros tenidos en cuenta en la campaña, también se consideraron variables como: Hora de muestreo, clima de la zona, número de personas habilitadas para ingresar a las piscinas del complejo turístico,



**Figura 9.**

*Dimensiones de la piscina panorámica*



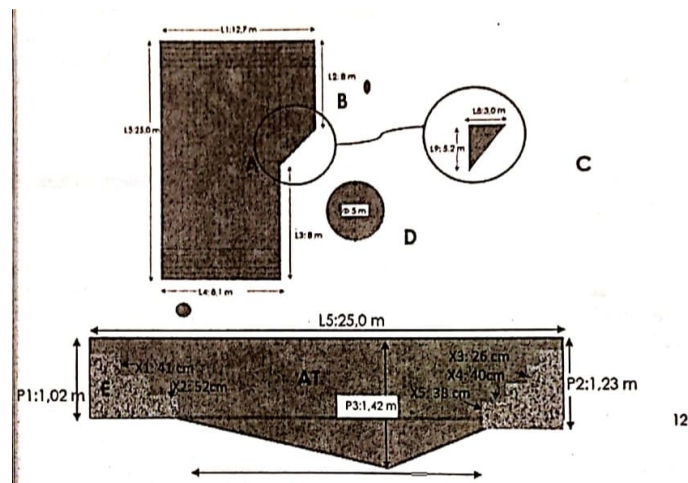
**Nota.** La figura muestra las dimensiones de la piscina panorámica del ITP. Tomado de: ITP."RE:Información piscinas ITP" email personal (16 de Junio, 2021)

- Piscina Cisnes: Esta piscina se llena por bombeo y se le hace mantenimiento los miércoles y sábado de cada semana y cuenta con un volumen útil de 261,3 m<sup>3</sup>.



**Figura 10.**

*Dimensiones de la piscina cisnes*



**Nota.** La figura muestra las dimensiones de la piscina olímpica del ITP. Tomado de: ITP."RE:Información piscinas ITP" email personal (16 de Junio, 2021)

- Hidroterapia: La piscina de Hidroterapia se llena por bombeo, a partir de Pozo azul.
- Biomédico: Esta piscina se utiliza los fines de semana, se inicia el llenado el día viernes a las 4 pm y se desocupa el lunes.
- SPA: Se llena por bombeo a partir de pozo azul y funciona los fines de semana únicamente. Se inicia llenado el viernes y se desocupa el lunes o martes si hay festivo.

Para el lavado de las piscinas con cada cambio de agua se adiciona agua proveniente del acueducto de red vital. Esta agua se aplica con manguera y se barre la piscina para retirar algas [50]. El proceso de lavado de las piscinas normalmente se realiza con agua y jabón, cuando se quiere retirar una mancha se utiliza cloro y esporádicamente se utiliza agua y ácido nítrico para el lavado de estas. Actualmente, a las piscinas del parque acuático (Olímpica, Panorámica y Cisnes) se les hace un lavado total dos veces por semana para, limpieza e higiene, este consiste en un recambio de un porcentaje de la lámina de agua, esto se debe hacer por la frecuencia de uso y la evaporación que se produce naturalmente. Los anteriores factores contribuyen a la disminución de la

temperatura del agua, la cual casi siempre se encuentra en 34°C para las piscinas del parque acuático.

**Figura 11.**

*Instituto termal de Paipa*



**Nota.** Esta imagen muestra una imagen satelital del Instituto Termal de Paipa y sus alrededores, donde 1 es el canal de vertimiento de las aguas de las piscinas termales, 2 es la fuente de agua termal llamada pozo azul y 3 es el complejo de piscinas compuesto por Olímpica, Panorámica y Cisnes. Tomado de Google Earth. (s.f).[Indicaciones de Google Earth para observar la ubicación del ITP].

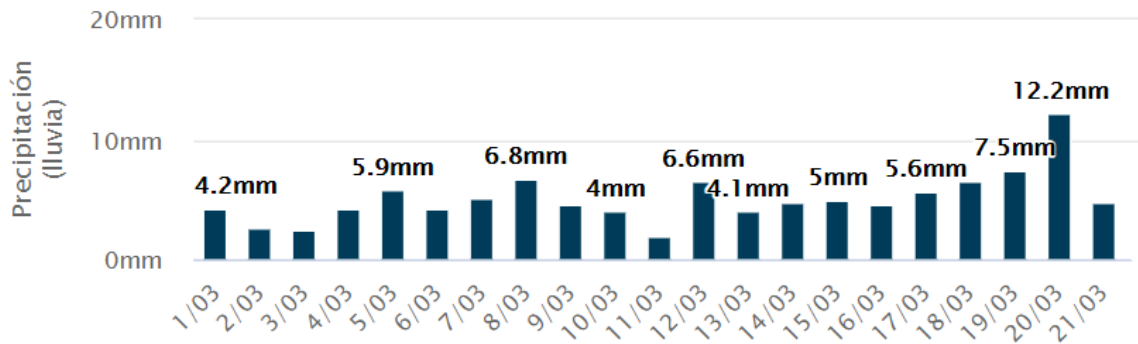
La campaña de muestreo se realizó los días 18, 19 y 20 de marzo de 2021, específicamente en el canal de Varga donde se realizan los vertimientos de aguas residuales, este se encuentra resaltado en la Figura 4. El canal recibe los vertimientos de todo el complejo turístico, el cual está dividido en tres áreas.

- El parque acuático, compuesto por tres piscinas: Olímpica, Cisnes y Panorámica. Siendo la piscina Olímpica es la más profunda y más grande del ITP.
- El centro Biomédico y Spa termal, son dos piscinas que se encuentran cubiertas.
- Hidroterapia, cuenta con una piscina al aire libre.

En total el ITP cuenta con 6 piscinas las cuales llevan sus vertimientos hasta el río Chicamocha. Durante el recorrido hasta el río estas aguas son utilizadas por las ciudades o pueblo aledaños quienes utilizan estos afluentes para riego u otros usos. Por esto, es de gran importancia analizar los parámetros y las condiciones en que se encuentran este tipo de vertimientos para evitar posibles efectos secundarios. Para los siguientes análisis se tuvieron en cuenta diferentes parámetros como, por ejemplo, la precipitación que se presentó en los 3 días de campaña.

**Figura 12.**

*Precipitación en Duitama en el mes de marzo del 2021*

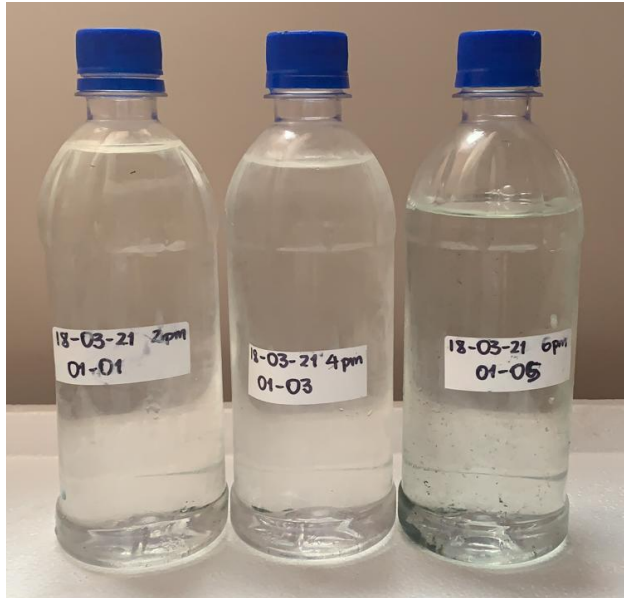


**Nota.** La grafica representa el nivel de precipitación alcanzado en los días del mes de marzo del 2021. Tomado de “Clima en Duitama en marzo 2022 - Tiempo, Temperatura y Clima en marzo.” <https://www.adonde-y-cuando.es/when/america-sur/colombia/duitama/marzo/> (accessed Apr. 20, 2021).

El primer día de campaña presento una temperatura de 9 a 18°C y una precipitación de 6,5 mm, este día se tomaron tres muestras las cuales fueron captadas de 2 a 6 de la tarde en intervalos de dos horas, en este tiempo hubo sol y lluvia, la lluvia se presentó de una manera más fuerte y frecuente después de las 4 de la tarde. Por otro lado, la afluencia de este día fue de 78 personas de ingreso a piscinas.

**Figura 13.**

*Muestras tomadas el 18/03/2021 en  
campaña de muestreo*

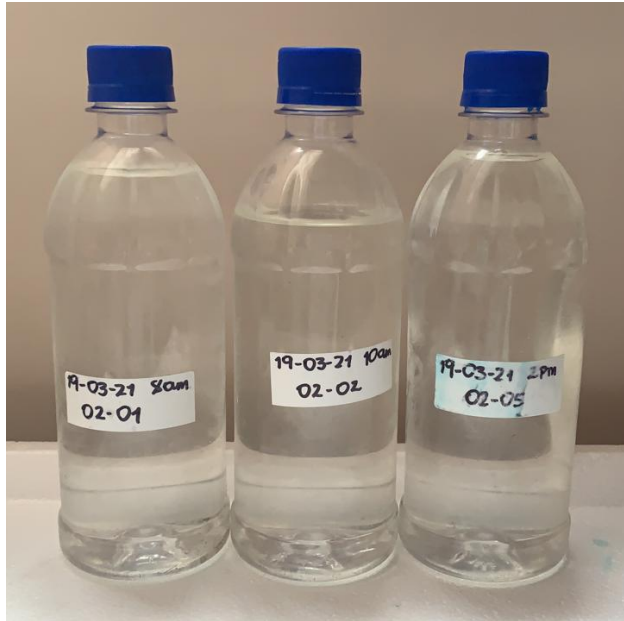


**Nota.** La imagen evidencia la captación de muestras de agua para análisis de campaña de muestreo realizada en el ITP en su canal de vertimientos, Canal de Varga.

El segundo día presento una temperatura de 8 a 18°C y una precipitación de 7,5 mm, este día se tomaron tres muestras las cuales fueron captadas de 8 a 2 de la tarde en intervalos de dos horas, en este tiempo hubo sol. Por otro lado, la afluencia de este día fue de 125 personas de ingreso a piscinas.

### Figura 14.

*Muestras tomadas el 19/03/2021 en campaña de muestreo*



**Nota.** La imagen evidencia la captación de muestras de agua para análisis de campaña de muestreo realizada en el ITP en su canal de vertimientos, Canal de Varga.

El tercer día presento una temperatura de 10 a 17°C y una precipitación de 12,2 mm, fue el día de mayor lluvia constante, se tomaron cinco muestras las cuales fueron captadas de 8 a 6 de la tarde en intervalos de dos horas y se analizaron 4 de estas. Por otro lado, la afluencia de este día fue de 421 personas de ingreso a piscinas.

**Figura 15.**

*Muestras tomadas el 20/03/2021 en campaña de muestreo*



**Nota.** La imagen evidencia la captación de muestras de agua para análisis de campaña de muestreo realizada en el ITP en su canal de vertimientos, Canal de Varga.

Los resultados de la campaña de muestro se indican a continuación:



**Tabla 4.***Resultados campaña de muestreo para vertimientos termales en Paipa 2021*

<b>Fecha de Captación</b>	<b>Hora de Captación</b>	<b>Cloruros (mgCL<sup>-</sup>/L)</b>	<b>Sulfatos (mgSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/L)</b>	<b>Precipitación (mm)</b>
18/03/2021	14:00:00	5692	8,9	6,5
18/03/2021	16:00:00	4683	8,9	6,5
18/03/2021	18:00:00	5572	8,9	6,5
19/03/2021	08:00:00	4155	8,9	7,5
19/03/2021	10:00:00	4539	8,9	7,5
19/03/2021	14:00:00	5284	8,9	7,5
20/03/2021	08:00:00	5524	8,9	12,2
20/03/2021	10:00:00	4563	8,9	12,2
20/03/2021	12:00:00	4755	8,9	12,2
20/03/2021	16:00:00	5764	8,9	12,2

**Nota.** En esta tabla se presentan los resultados obtenidos en la campaña de muestro para concentración de cloruros y sulfatos en un vertimiento de agua termal.

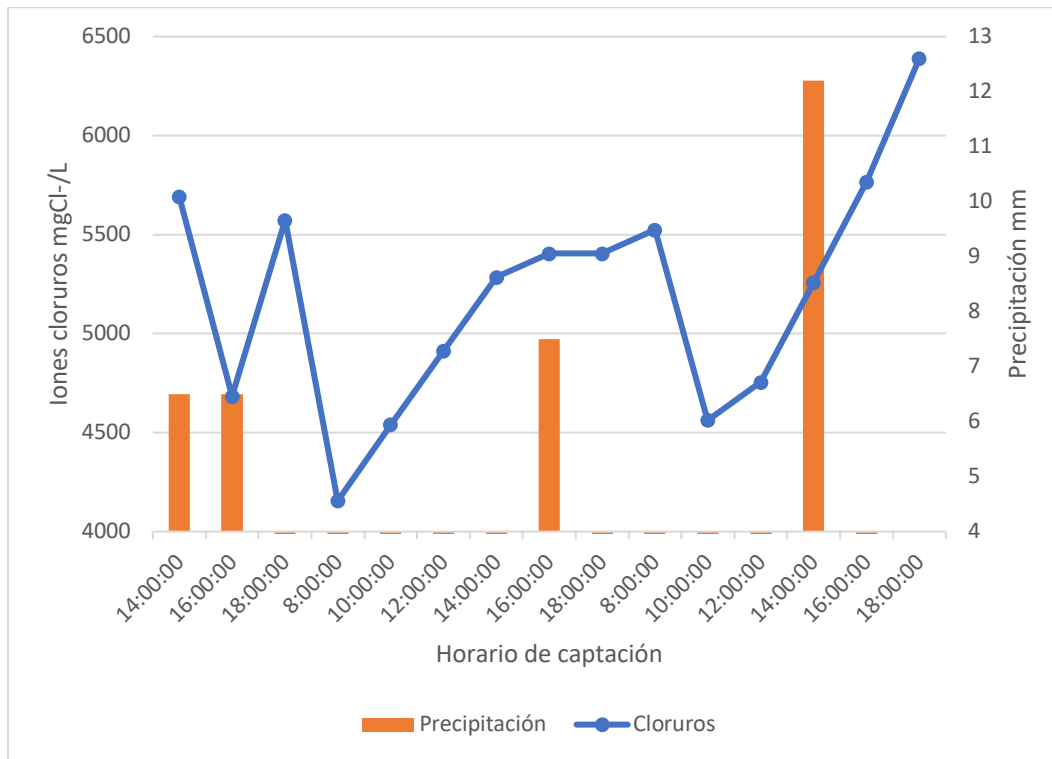


Los valores obtenidos se compararon con la resolución 0631 de 2015, establecida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, la cual establece “los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones”, sin embargo, es importante aclarar que no existe un artículo que estipule la normativa para vertimientos de aguas termo minerales y al no ser un vertimiento de agua dulce, no se rige completamente por esta normativa.

Considerando los resultados presentados en la tabla 4, además de las condiciones meteorológicas que se presentaron durante los 3 días en los que se adelantó la campaña de muestreo, es posible determinar como hipótesis que la concentración de iones cloruro en las corrientes de descarga está directamente relacionada con la precipitación.

**Figura 16.**

*Relación de iones cloruros y precipitación diaria en las horas de captación de la campaña de muestreo*



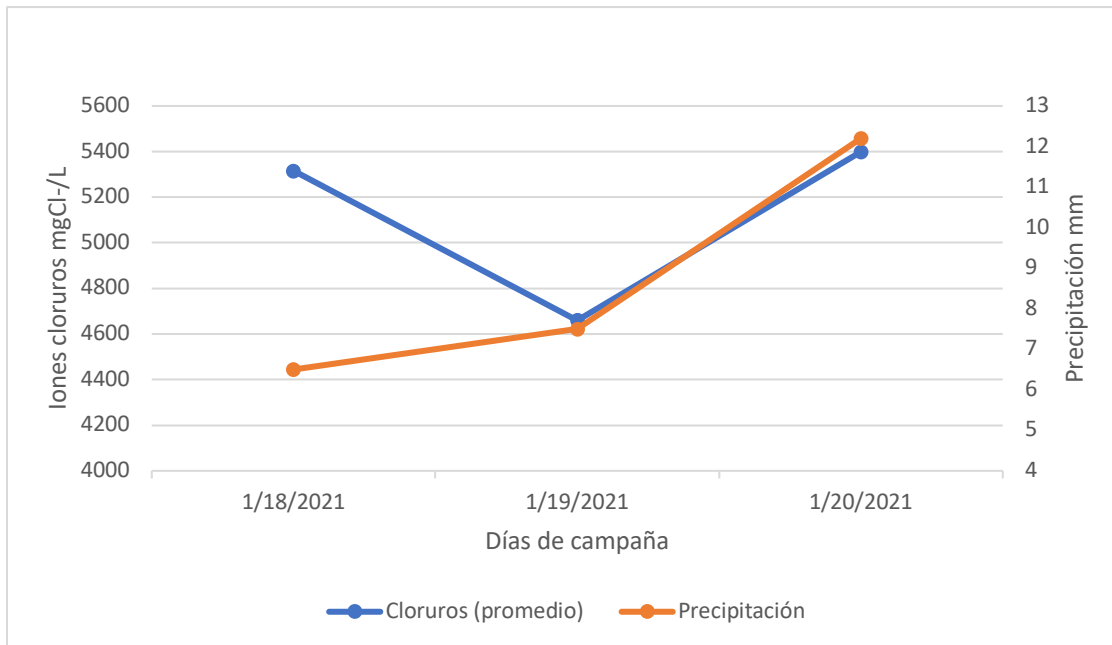
**Nota.** En esta grafica se evidencia la relación entre los iones cloruro, la precipitación y la hora de la captación de muestras realizada en los días 18, 19 y 20 de marzo de 2021, en campaña de muestreo.

Con el fin de visualizar la tendencia que tiene la concentración de iones cloruro con respecto a la precipitación, en la figura 13 se plasman los resultados en conjunto para las 11 muestras analizadas. Para esto se tiene en cuenta que, durante el muestreo, las lluvias no fueron constantes, así que se representan desde el momento que inició para cada día.

Además, es importante considerar que la hora final de las mediciones durante los 3 días que duró la campaña de muestreo fue a las 6 de la tarde, ya que el horario de funcionamiento del instituto y por ende del uso de las piscinas no se extiende mas allá de este horario.

**Figura 17.**

*Relación de iones cloruros y precipitación diaria en campaña de muestreo*



**Nota.** En esta grafica se evidencia la relación entre los iones cloruro y la precipitación presentados en los días 18, 19 y 20 de marzo de 2021, en campaña de muestreo.

En la Figura 14, se complementa la hipótesis mencionada anteriormente, ya que en esta grafica se puede evidenciar la relación proporcional de la concentración de cloruro con la precipitación. Para esta conclusión, se tuvieron en cuenta valores promedio de concentración de iones cloruros para los diferentes días de campaña, sin embargo, los resultados obtenidos para el día jueves presentan variaciones ya que solo se llevó a cabo el proceso de recolección de muestras en horas de la tarde, por lo que no se cuenta con registro de concentración de iones cloruro en el horario de la mañana.

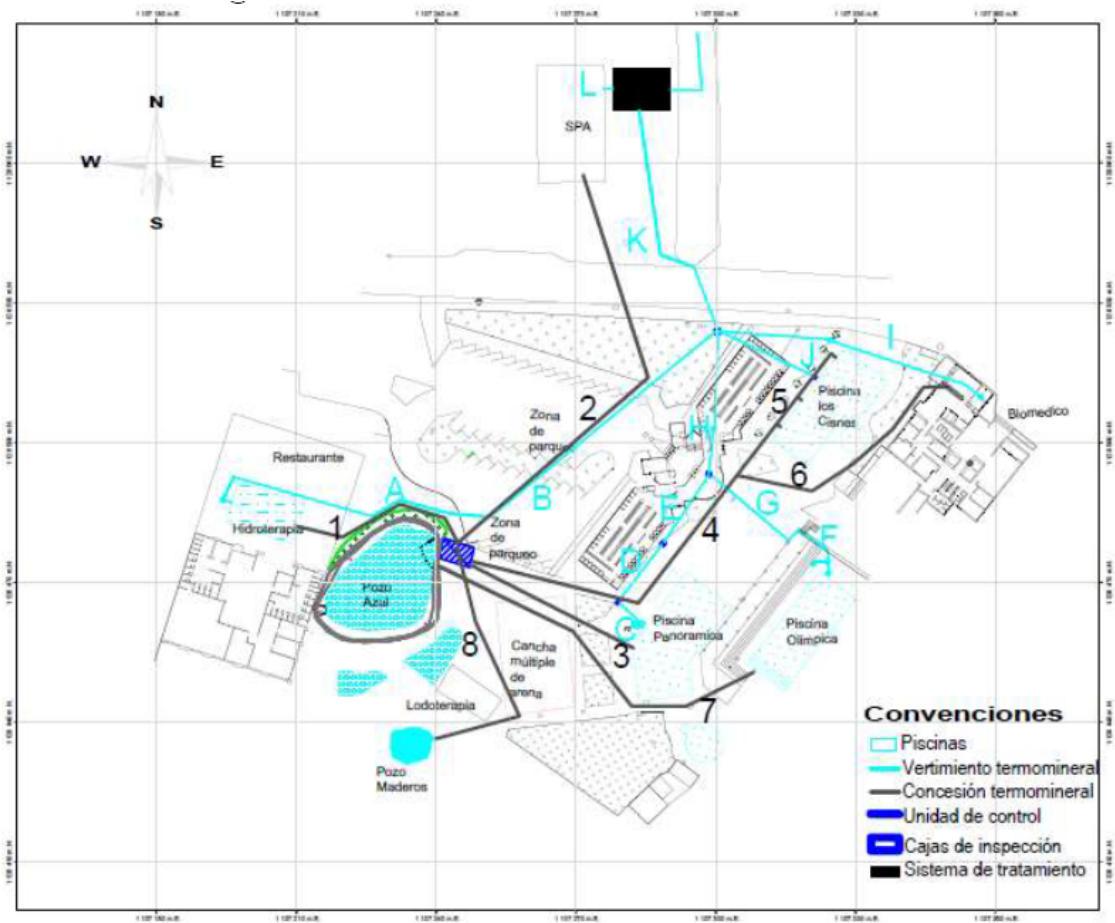
Por otro lado, la ocupación registrada no representaría una afectación considerable a los valores registrados. Teniendo en cuenta que se disminuyó el aforo de personas que tienen permitido ingresar al complejo turístico, por cuenta de la contingencia sanitaria debido al COVID-19, se podrían generar variaciones una vez se trabaje con la capacidad usual.

De acuerdo a los resultados presentados en la tabla 4, la concentración de iones cloruros en los vertimientos supera en un 2305,5% la normativa, la cual tiene un mínimo de 250 mgCl<sup>-</sup>/L. Los valores críticos se identifican el día sábado, donde la afluencia de personas aumenta, ya que, a pesar de ser un día laboral para muchos, este también se destina para actividades de recreación. Se debe tener en cuenta que la afluencia de estos días fue de únicamente de un 30%, considerando la situación de contingencia actual, la cual ha causado grandes afectaciones para diferentes sectores del país, en este caso el turístico.

Aun con un menor porcentaje de afluencia se sigue evidenciando que los vertimientos de las aguas termo minerales del ITP afectan al río Chicamocha, no obstante por ser una zona turística a su alrededor también cuentan con zonas hoteleras que cuentan con termas sin embargo, el ITP solo reporta lo captado del pozo azul, pues esta es su principal concesión de agua termal, la cual se encarga de abastecer las piscinas. También cuentan con el pozo maderos, este se encarga del centro de hidroterapia para el cual tiene un solo caudal.

**Figura 18.**

*Distribución de la red hidráulica del ITP*



**Nota.** En esta grafica se verifica la fuente de captación, Pozo Azul, para las unidades pertenecientes al Instituto de Turismo de Paipa. Tomado del ITP y Quipus consultores S.A.S, “Reporte de ITP para red hidráulica”, 2021.

Por medio del esquema planimétrico representado en la figura 15, es posible observar la distribución del espacio disponible. También, se representan los detalles relacionados con el sistema de abastecimiento de las piscinas termales dentro del complejo turístico, así como las líneas de descarga una vez se cumple con el ciclo de uso de cada una de estas. Es importante destacar que se cuenta con unidades de control a lo largo del sistema de tuberías, permitiendo así asegurar un funcionamiento adecuado en el complejo turístico.

Los problemas ambientales generados por estos vertimientos se han identificado con anterioridad, por esta razón el instituto turístico realizó una propuesta que consta de dos fases. Inicialmente se cuenta con un aireador y disipador de temperatura, los cuales se encargan de favorecer la temperatura y evitar un sobrecalentamiento de la unidad para facilitar la próxima fase. Seguido de esto, se encuentra una trampa de grasas que se encargan de retardar el flujo del agua, así las grasas tienen tiempo de separarse de la corriente de agua. Una vez se separan, quedan flotando en la superficie mientras que otros sólidos con mayor peso se depositan en el fondo de la trampa.[51] El secuenciamiento propuesto permite que el proceso de separación y limpieza sea más efectivo, garantizando condiciones de operación óptimas.

A pesar de lo anterior, esta propuesta aún no tiene fecha de ejecución ni un presupuesto confirmado, no obstante, la realización de esta propuesta demuestra el compromiso por parte del instituto para reducir el impacto ambiental generado por las actividades que allí se adelantan.

Por otro lado, se tomó en cuenta el valor de pH registrado en los estudios realizados con anterioridad por parte del instituto, donde se registró un rango de 6,38 a 7,54 para esta variable. Además, la medición de la conductividad se llevó a cabo en los laboratorios de la Universidad de América utilizando un conductímetro, sin embargo, las muestras estaban fuera de rango, por lo que no se registró ningún valor.

### **3. SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA PARA EL TRATAMIENTO DE IONES SULFATOS Y CLORUROS DE LAS AGUAS PROVENIENTES DE PISCINAS TERMALES TENIENDO EN CUENTA CRITERIOS TÉCNICOS Y AMBIENTALES**

En este capítulo se llevará a cabo la selección del tratamiento para aguas termales con altas concentraciones de iones sulfatos y cloruros, a partir de la bibliografía revisada previamente, los resultados de la campaña de muestreo y una encuesta realizada a profesionales los cuales han tenido experiencias relacionadas con esta investigación, esto con el fin de realizar una propuesta de tratamiento la cual cuente con criterios técnicos y ambientales.

#### **3.1. Revisión bibliográfica de pretratamientos, tratamientos primarios, secundarios y terciarios**

Los tratamientos para aguas residuales se dividen de acuerdo a su clasificación y su utilización final, estos pueden ser físicos, químicos o biológicos y cuentan con cuatro etapas, las cuales corresponden a procesos de pretratamiento, tratamiento primario, secundario y terciario.

Para el manejo de aguas residuales se utilizan tratamientos terciarios, que son procesos físicos y químicos especiales con los que se consigue eliminar contaminantes como: fósforo, nitrógeno, minerales, metales pesados, virus, compuestos orgánicos, entre otros [8]. Es necesario la implementación de este tipo de tratamientos para adecuar la calidad del agua residual a la normativa establecida, permitiendo su reutilización en otros procesos. Es importante tener en cuenta que se aplican en función de la calidad final que se desee conseguir, este tratamiento estará centrado en eliminar selectivamente aquellos contaminantes más preocupantes desde el punto de vista del uso final que se le dará a la corriente a tratar [66]. Considerando las características descritas, se consideran como tratamientos terciarios a procesos como intercambio iónico, adsorción, micro filtración, ultrafiltración, osmosis inversa, nano filtración, electrodiálisis, ozono, entre otras.

### 3.1.1. Primera fase de tratamiento

3.1.1.i. Carbón activado. Es un carbón poroso preparado artificialmente a través de un proceso de carbonización, para que este exhiba un elevado grado de porosidad y una alta superficie interna. Es un producto obtenido a partir del carbón amorfo, el cual se ha sometido a un tratamiento de activación con el fin de incrementar su área superficial hasta 300 veces debido a la formación de poros internos, pudiendo alcanzarse áreas de 1200-1500 m<sup>2</sup> /g de carbón [52]. Este material se ha caracterizado por su alta versatilidad, principalmente por sus propiedades adsorbentes las cuales se favorecen por su estructura porosa y su interacción con adsorbatos generada por su estructura química, esto lo hace apto para eliminar contaminantes disueltos en aguas residuales y domésticas. Algunos investigadores como Zumei Sun señalan que el fenómeno de adsorción de iones cloruros sobre el carbón activado representa una técnica económica, viable y sostenible para el tratamiento de efluentes industriales.

#### **Figura 19.**

*Carbón activado granular*

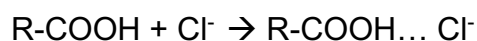


Nota. La figura muestra el aspecto físico del carbón activado granular empleado para tratamiento de aguas. Tomado de Agua Market, “Cotización Carbón Activado Granular”, [En línea]. Disponible: <https://www.aguamarket.com/productos/productos.asp?producto=969>



La relación entre el ion cloruro y el carbón activado se fundamenta en el principal enlace químico entre estos, el cual es el enlace de hidrógeno. La adsorción en carbón activado de compuestos inorgánicos en fase acuosa, se da por la disminución del carácter hidrófobo del CA, este se consigue por oxidación de un tipo de agente oxidante que crea grupos oxigenados lo cual, genera adsorción de moléculas de agua que más adelante adsorberán nuevas moléculas por formación de puentes de hidrógeno [53].

No obstante, el factor principal en la formación de enlaces de hidrógeno entre el ion cloruro y el CA son los grupos carboxilo, estos son capaces de inducir una serie de reacciones de formación de enlaces con iones cloruro. Estos grupos funcionales oxigenados en la superficie de CA crean una superficie positiva [54].



Existen dos fuerzas de atracción entre el ion cloruro y el CA, los enlaces de hidrogeno y las fuerzas de Van der Waals, las cuales pueden surgir aún más en la zona de no formación de enlaces de hidrogeno, la formación de estas dos está asociada con el pH.

«Un pH <4.0 es la región de formación del enlace de hidrógeno; Los valores de pH entre 4.0 y 10.0 son la región de transición donde el enlace de hidrógeno y las fuerzas de Van der Waals trabajan juntas, y los valores de pH > 10 son la región que no se forma donde no se forman los enlaces de hidrógeno y las fuerzas de Van der Waals son el mecanismo principal para el cloruro eliminación de iones.»

El intercambio iónico en la superficie del carbón activado está influenciado por centros activos, dislocaciones y discontinuidades, debido a que la matriz carbonácea tiene electrones desapareados y valencias insaturadas presentando mayor energía potencial [53]. Su alta superficie interna es la que tiene la capacidad de eliminar sustancias, esto se complementa con sus microporos ya que estos son los responsables de su elevada superficie y capacidad de retención.

Es importante tener en cuenta que las características anteriores son gracias a la forma activa del carbón, pues esta propiedad es la que amplifica la superficie de adsorción y con esto su capacidad adsorbente [55]. Adicional a esto, una de las mejores características de este material en estado activo es la regeneración, cuando el adsorbente y el carbón tienen fuerzas de unión no tan fuertes es posible eliminar el adsorbente del carbón activo posibilitando de nuevo el uso de este como adsorbente. La regeneración del carbón activado es la mejor característica en términos económicos, sin embargo, esta depende de lo eficaz del medio en que se encuentre y de su estructura, ya sea en polvo o granular.

Dependiendo del tamaño de partícula, se puede clasificar el carbón activado en distintos tipos, los cuales son empleados en aplicaciones distintas:

- **Carbón Activado en Polvo (PAC):** Se trata de un carbón activado cuyo tamaño de partícula es inferior a 0,18 mm. Es empleado habitualmente en procesos de purificación de aire y aguas, además de ser empleado como catalizador. Tras su uso, puede ser separado del fluido a través de filtración [55].
- **Carbón Activado Granular (CAG):** Se trata de un carbón activado cuyo tamaño de partícula es superior a 0,18 mm. Contiene partículas fracturadas de diversos diámetros. Este tipo de carbón activado es empleado habitualmente en el control de emisiones de automoción y para limpieza de aguas [55].
- **Carbón Activado Peletizado:** También denominado carbón activado extruido dada su producción, este tipo de carbón activado se presenta en forma de pequeños cilindros con diámetros característicos de entre 4 y 10 mm. Es empleado en purificación de aire o de gas a través de unidades de filtración [55].

Este material es usado en tratamientos de agua residual donde su capacidad de adsorción es la encargada de eliminar tanto compuestos orgánicos como inorgánicos. Normalmente, estos tratamientos se llevan a cabo con CAG (Carbón activado granular)

donde se emplea una columna como medio de contacto del agua residual con el material adsorbente.

**Figura 20.**

*Columna de tratamiento de agua residual con CAG*



**Nota.** Figura con especificaciones de una columna de tratamiento de agua residual con CAG. Tomado de “Manual del carbón activo.” Accessed: May 05, 2021. [Online]. Available: [http://www.elaguapotable.com/Manual del carbón activo.pdf](http://www.elaguapotable.com/Manual%20del%20carb%C3%B3n%20activo.pdf).

Estas columnas pueden utilizar CAG en lecho fijo o lecho móvil. Para evitar problemas de obstrucción de la superficie del lecho, se recomienda trabajar con lecho móvil el cual, se encarga de sustituir el carbón de manera continua, es decir, la pérdida de carga no aumenta una vez se alcance el punto de funcionamiento [52]. Sobre estos lechos de carbón activo se encuentran filtros de medio granular, que están encargado de eliminar

la materia orgánica soluble asociada a los sólidos suspendidos presentes en efluentes secundarios, algunas veces las concentraciones de estos sólidos generan la presencia de depósitos en los granos de carbón, lo cual causa pérdidas de presión, canalización y obstrucción del flujo, y pérdida de capacidad de adsorción [52]. “Si la eliminación de la materia orgánica soluble no se mantiene a límites bajos, puede ser necesario aumentar la frecuencia del proceso de regeneración del carbón. La variabilidad en las condiciones de pH, temperatura y caudal también pueden afectar al rendimiento del carbón activado.”

Por otro lado, el carbón activado que cuente con su estructura en polvo, generalmente se usa para purificación de líquidos, donde se dosifica en un tanque con agitación y luego se separa del líquido por medio de un filtro prensa. Sin embargo, por la finura de este tipo de carbón puede ser necesario emplear un coagulante.

3.1.1.ii. Biocarbón activado. En 2012 la International Biochar Initiative define al Biocarbón como un material sólido obtenido de una conversión termoquímica de biomasa en un ambiente limitado de oxígeno. Este se crea a través de procesos como la pirólisis de la biomasa, la cual se produce a temperaturas entre 350°C y 800°C, lo cual no genera grafito de manera significativa [56].

El Biocarbón tiene la característica de reducir la cantidad de carbón emitido a la atmósfera, y también es un excelente sustituto ecológico del carbón activado. Este tiene amplios campos de aplicación ambiental como la adsorción para contaminantes de agua y aire, catálisis para mejora del gas de síntesis, entre otros [57].

Las características físicas y químicas de los carbones vegetales dependen de las condiciones de la pirólisis y tipo de materia prima principalmente, lo cual se ve reflejado en los productos obtenidos y su influencia en su uso más adecuado [56].

Generalmente la activación de este Biocarbón se puede producir por los siguientes métodos:

- **Activación química:** Se realiza con el uso de una sustancia deshidratante, que puede ser un ácido, se mezcla con la materia prima y se somete a un tratamiento a temperaturas moderadas. Esta técnica puede ser problemática porque, por ejemplo, al usar como agente deshidratante cloruro de zinc los residuos del zinc pueden permanecer en el producto final, aún después de lavado [58].
- **Activación física o del vapor o térmica:** El material carbonizado se trata con una mezcla de gases de combustión y vapor de agua a una alta temperatura para que se active [58].
- **Activación biológica:** Resulta de la activación del biocarbón con el uso de microorganismos principalmente del bosque en un determinado periodo de tiempo [59].

En algunos casos la modificación química del carbón activado con nuevas fuentes como la biomasa, origina un incremento de los grupos ácidos (carboxílicos, lactonas y fenoles) existentes en la superficie del material adsorbente y de la humedad. “El aumento de la humedad es un aspecto positivo para la posible utilización del material adsorbente en la remoción de cationes presentes en soluciones acuosas.” [60]

El biocarbón es una buena propuesta para uso en tratamiento de aguas en Colombia, pues gracias a la suficiente biomasa disponible en el país, esta sería una gran oportunidad para aprovechar los residuos orgánicos urbanos y utilizarlos como materia prima en diferentes procesos, sin olvidar que con este se realizarían mejoras en el suelo colombiano.

3.1.1.iii.Fique. Los MDA, Materiales de Desecho Agrícola, son potenciales para adsorción e intercambio iónico en tratamiento de aguas residuales, su bajo costo y disponibilidad son características que los hacen materiales llamativos.

Su capacidad natural de adsorción se debe a los diferentes grupos funcionales presentes en la superficie de estos, sin embargo, las investigaciones se han centrado hacia la

capacidad de incrementar su capacidad natural de retención de contaminantes, algunos materiales que han sido estudiados son Paja de trigo, Cascara de naranja, Bagazo de caña de azúcar y fique [61]. La fibra de fique posee unos componentes importantes los cuales cuentan con grupos funcionales característicos: Celulosa(C-H, R-OH, CH<sub>2</sub>) , Hemicelulosa (C-H, R-OH, CH<sub>2</sub>), Lignina (C=C, C=O, C-O).

El fique o *Furcraea cabuya*, es una planta con tallo sin ramificación de hasta 1,5m de alto, este puede tener hasta 100 hojas de 2 m de largo y 20 cm de ancho, sus hojas y tallo son empleados para múltiples usos tales desde artesanías hasta coadyuvante de coagulación.

Colombia es un país productor de fique, el énfasis de la siembra de fique se encuentra en los departamentos de Cauca, Santander, Nariño, Antioquia y Boyacá. De acuerdo a lo anterior, se han realizado estudios para diseñar sistemas de filtración de fique, en donde algunos determinaron que el fique presenta buena capacidad de adsorción de iones y que su utilización como lecho fijo es posible, sin embargo, hace falta realizar pruebas de desorción y regeneración para probar su viabilidad a mayor escala [62].

3.1.1.iv.Hidrotalcitas. Las hidrotalcitas son arcillas que permiten eliminar del agua ciertos contaminantes, tienen la capacidad de adsorber iones y hacer menos corrosiva el agua. [63] Estas pueden ser naturales o sintéticas y tienen la característica de ser compuestos nano estructurados bidimensionales con estructura laminar.

Estas pertenecen a una familia de compuestos inorgánicos conocidos como hidróxidos dobles laminares (HDL), son minerales que forma parte del grupo de las arcillas aniónicas y su fórmula química estructural es:  $[Mg_6Al_2(OH)_{16}](CO_3) \cdot 4H_2O$  [64]. Los HDL son arcillas llamativas, por su alta capacidad de adsorción, gran estabilidad química y térmica, de síntesis sencilla y económica.

Su efecto memoria o efecto “huella” es la propiedad que mayores beneficios trae en la implementación de procesos de adsorción y adsorción-desorción. Son excelentes

adsorbentes de compuestos aniónicos en solución acuosa, esta capacidad es debido a su estructura. Su capacidad de adsorción de los aniones depende de la naturaleza y radio iónico de los mismos [65].

La hidrotalcita tiene una capacidad de intercambio aniónico, siendo el anión carbonato el predominante, sin embargo, el  $\text{Cl}^-$  ocupa la cuarta posición de esta secuencia. También se comprobó una dependencia entre la distancia laminar y la capacidad de intercambio, pues esta llega a su máximo en el material cuando los aniones presentes en la región interlaminar son nitratos o cloruros, los cuales son ideales para reacciones de intercambio [63].

Este material representa una excelente opción para tratamiento de aguas con iones cloruro, pues su capacidad de intercambio iónico llega a su máximo con este precursor para las reacciones de intercambio.

### **3.1.2. Segunda fase de tratamiento**

3.1.2.i. Intercambio iónico. El intercambio iónico es la operación unitaria que permite la separación de las especies iónicas disueltas a través de su transferencia de la fase líquida a un material intercambiador sólido, donde reemplazan otros iones del mismo signo eléctrico que, a su vez pasan a la fase líquida [67]. Este tipo de tratamiento es estable y permite el intercambio predecible de iones no deseados por iones deseados y se aplica en diferentes industrias de procesos, sin embargo, no puede eliminar de forma eficaz los compuestos orgánicos disueltos como los pesticidas y los bifenilos policlorados (PCB) ya que estos materiales no se ionizan [68].

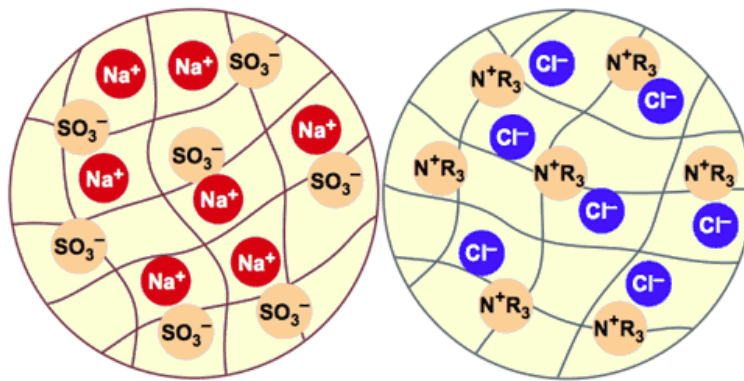
#### **Resinas de intercambio iónico:**

Son sustancias granuladas o esféricas no solubles en agua que están compuestas por una alta concentración de grupos polares, ácidos o básicos que se encuentran incorporados a una matriz polimérica reticulada por la acción de un agente entrecruzante.

Este tipo de resinas reaccionan como bases, sales o ácidos, sin embargo, tienen la peculiaridad de tener sólo cationes o aniones con la habilidad de hacer parte de la reacción química debido a su capacidad de migración. Trabajar con estos materiales tiene una gran ventaja en cuanto a la habilidad de recuperación, ya que por medio de un tratamiento con una solución que puede ser ácido, base o sal (dependiendo de la resina y el uso que se le dé) se desplazan los iones retenidos por la resina y se reemplazan por los deseados [69].

**Figura 21.**

*Representación esquemática de resinas de intercambio iónico*



**Nota.** La figura representa la esquematización de las resinas de intercambio catiónico y aniónico. Tomado de “Intercambio iónico: información general y principios.” [http://dardel.info/IX/IX\\_Intro\\_ES.html](http://dardel.info/IX/IX_Intro_ES.html) (accessed March 11, 2021).

### **Capacidad de intercambio:**

Hace referencia a la cantidad de iones que la resina puede intercambiar en determinadas condiciones experimentales, esta característica depende también del tipo de grupo activo y del grado de entrecruzamiento de la matriz, se expresa en equivalentes por litro de resina.



### Capacidad total de la resina:

Se define como el número de grupos activo, se expresa en equivalentes por litro de resina y está directamente relacionado con el tipo. A continuación, se resume la capacidad total de las resinas de acuerdo a sus características [70].

**Tabla 5.**

*Capacidad total de las resinas de intercambio iónico*

Tipo de resina	Capacidad total (eq/L)
Intercambiadora de cationes fuertemente ácida	1.8 – 2.2
Intercambiadora de cationes débilmente ácida	3.7 – 4.5
Intercambiadora de aniones débil o fuerte	1.1 – 1.4

**Nota.** Esta tabla muestra los resultados de algunos parámetros fisicoquímicos en el pozo azul, el ducto de salida de las piscinas y la normativa establecida por la resolución 0631 de 2015. Tomado de B. Reyna Avila, “El intercambio iónico, su descripción y comportamiento químico,” Instituto Politécnico Nacional, Mexico D.F, 2014.

Esta capacidad total se determina después de convertir la resina mediante técnicas de regeneración química en una forma iónica determinada. El ion se elimina de una cantidad medida de resina y se determina cuantitativamente en solución mediante el uso de métodos analíticos convencionales. La capacidad total con la que cuenta la resina se expresa en peso seco, peso húmedo o volumen húmedo [71].

### Estabilidad:

En cuanto a la estabilidad de las resinas, se debe tener en cuenta que los agentes oxidantes fuertes tales como el ácido nítrico o crómico, pueden llegar a degradarlas rápidamente y puede inducirse catalíticamente una degradación más lenta con cloro y oxígeno. Las resinas catiónicas altamente reticuladas cuentan con una vida útil

prolongada, gracias al gran número de sitios que deben ser atacados antes de que el hinchamiento reduzca la capacidad útil basada en el volumen, y produzca propiedades físicas inaceptables como la resistencia al aplastamiento y el aumento de la caída de presión [71].

#### **Límites de la estabilidad térmica:**

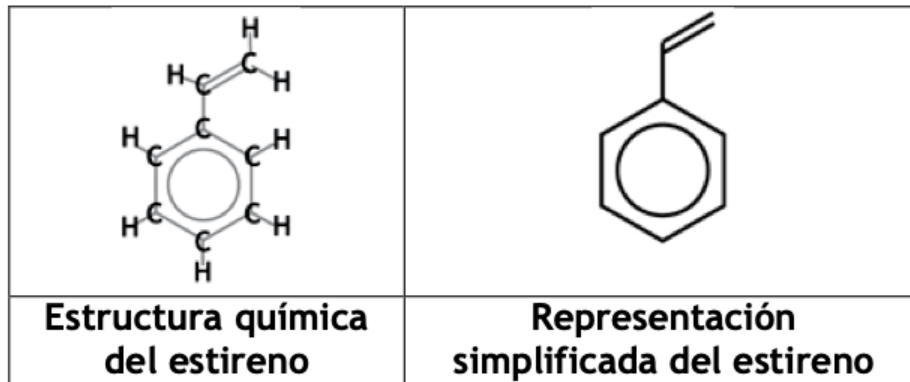
Están dados por la fuerza que existe entre el enlace carbón-nitrógeno en el caso específico de las resinas aniónicas. Esta fuerza es sensible al pH y la estabilidad mejora cuando se trabaja a valores bajos de pH y cuentan con una limitación en cuanto a la temperatura de trabajo que se recomienda no supere los 60°C para las operaciones del ciclo de hidróxido. Por último, la estabilidad de las resinas catiónicas depende del pH donde la estabilidad a la hidrólisis del enlace carbón-azufre disminuye con una disminución del pH pero son más estables que las resinas aniónicas y pueden trabajar a temperaturas de hasta 150°C [71].

#### **Estructura química de las resinas de intercambio iónico:**

Alrededor del 90% de las resinas están basadas en una matriz poliestirénica. La base para la construcción que se emplea para el esqueleto plástico es el monómero de estireno, compuesto aromático conocido también como vinilbenceno. Lo que permite su polimerización es el doble enlace del vinilo. Su estructura química se muestra a continuación:

**Figura 22.**

*Estructura química del estireno*



**Nota.** La imagen representa la estructura química del estireno, base para la construcción del esqueleto plástico de la matriz. Tomado de: B. Reyna Avila, "El intercambio iónico, su descripción y comportamiento químico," Instituto Politecnico Nacional, Mexico D.F, 2014.

**Figura 23.**

*Estireno polimerizado*



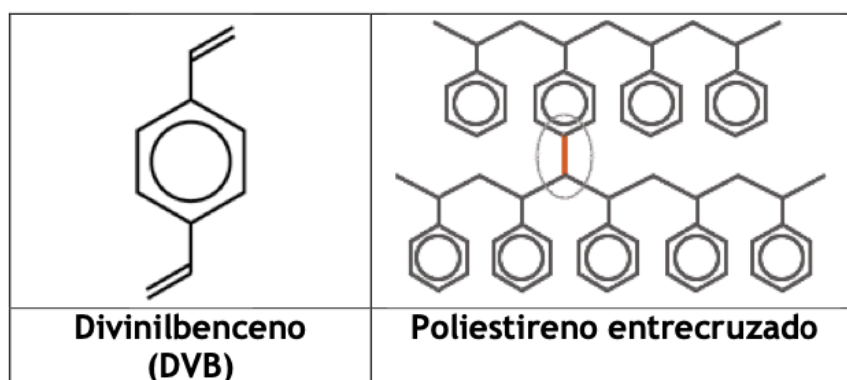
**Nota.** La imagen representa la estructura del estireno polimerizado. Tomado de B. Reyna Avila, "El intercambio iónico, su descripción y comportamiento químico," Instituto Politecnico Nacional, Mexico D.F, 2014.

Las cadenas lineales de polímero resultante se enredan entre ellas, pero tienen poca fuerza física. Para darle al polímero una estructura tridimensional más estable, las

cadenas formadas se entrecruzan con otra molécula durante la polimerización. El entrecruzado más común es el divinilbenceno (DVB). Los polímeros formados son perlas esféricas muy pequeñas, del rango de 200 a 500  $\mu\text{m}$  de diámetro.

**Figura 24.**

*Segundo enlace de la molécula DVB*



**Nota.** La imagen representa el entrecruzamiento de las cadenas lineales, dando como resultado poliestireno entrecruzado. Tomado de: B. Reyna Avila, "El intercambio iónico, su descripción y comportamiento químico," Instituto Politécnico Nacional, Mexico D.F, 2014.

La gran mayoría de las resinas de intercambio iónico se polimerizan de tal manera que el resultado final son gránulos esféricos, este proceso se puede dar en un reactor agitado o en un proceso de inyección en el que se obtiene un tamaño de gránulos uniforme [70].

### **Hinchazón:**

El hinchamiento por agua del intercambiador aniónico hace referencia a una hidratación de los grupos iónicos fijos y se incrementa con el aumento de capacidad, hasta alcanzar los límites impuestos por la red polimérica [71].

### **Cinética:**

Hace referencia a la velocidad con la que se produce el intercambio de iones, este proceso implica una difusión a través de la película de solución que se encuentra en

contacto con las resinas. Esta difusión que se da en la película es la que controla la velocidad a concentraciones bajas y la difusión de las partículas controla la velocidad a concentraciones altas. Otro factor importante es el tamaño de las partículas, las resinas de tamaño de partícula uniforme muestran un rendimiento cinético mejorado en comparación con aquellas resinas que son polidispersas convencionales, esto se debe a la ausencia de perlas grandes cinéticamente lentas [71].

En el mercado es posible encontrar diferentes tipos de resinas de intercambio iónico. Para su clasificación se tiene en cuenta el grupo iónico que proporciona la transferencia entre la solución conductora y la estructura sólida. A continuación, se hace una descripción más detallada.

**Resinas de intercambio catiónico de ácido débil:** Están basadas principalmente en un ácido acrílico o metacrílico que se ha reticulado con un monómero difuncional que generalmente es divinilbenceno (DVB). Tienen alta afinidad por el ion hidrógeno por lo que se regeneran fácilmente con ácidos fuertes [71]. Se destaca que este tipo de resinas tienen menor capacidad de intercambio, no son funcionales a pH bajos, presentan un elevado hinchamiento y contracción lo que puede ocasionar el aumento en las pérdidas de carga o provocar roturas en la columna cuando no se cuenta con el suficiente espacio en su interior. Requiere menos ácido para su regeneración y están sujetas a una menor capacidad por un aumento en la velocidad de flujo. Fijan cationes de calcio, magnesio, potasio y sodio [72].

**Resinas de intercambio catiónico de ácido fuerte:** Son copolímeros sulfonados de estireno y DVB, este tipo de materiales suelen caracterizarse por la capacidad que tienen para intercambiar cationes o dividir sales neutras y son útiles en todo el rango de pH [71]. El grupo funcional de estas resinas es el ácido sulfónico ( $-\text{SO}_3\text{H}$ ) que es ionizable, por otro lado, es el tipo más utilizado y requiere excesivas cantidades de regenerante como ácido clorhídrico o cloruro de sodio [72]. Están destinadas principalmente aplicaciones de ablandamiento o suavizado del agua [73].

**Resinas de intercambio aniónico de base débil:** No contienen sitios iónicos intercambiables, tienen la capacidad de absorber ácidos fuertes y es posible regenerarlas fácilmente con soda caustica. Estas resinas son efectivas cuando se utilizan en conjunto con un anión de base fuerte al proporcionar una alta capacidad operativa y eficiencia de regeneración [71]. Cuentan con grupos de amina primaria (-NH<sub>2</sub>), secundaria (-NHR) y terciaria (-NR<sub>2</sub>). No es posible utilizarlas a pH muy altos, pueden llegar a sufrir problemas de oxidación o ensuciamiento, además, deben ser utilizadas en aguas que se caractericen por tener niveles elevados de cloruros o sulfatos o en casos donde no se requiera la eliminación de la alcalinidad y del silicio [72].

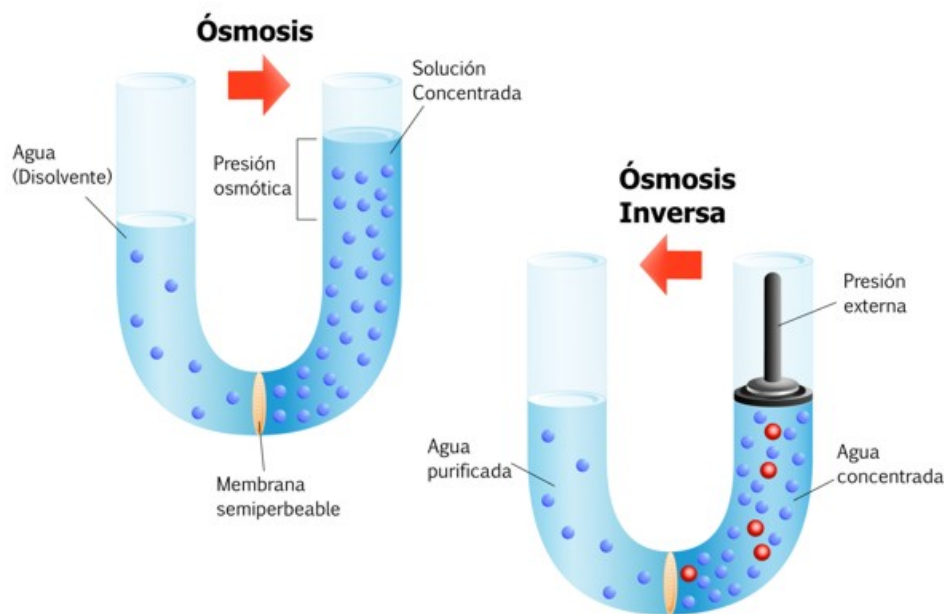
**Resinas de intercambio aniónico de base fuerte:** Se clasifican en tipo 1 y 2. Las resinas tipo 1 son producto de amina cuaternizada elaborada mediante la reacción de trimetilamona con el copolímero posterior de la clorometilación. Tiene mayor afinidad por ácidos débiles como lo son el ácido silícico y carbónico que se encuentran generalmente en procesos de desmineralización del agua. Las resinas tipo 2 son aquellas en las que su funcionalidad se obtiene mediante la reacción del copolímero de estireno-DVB con dimetiletanolamina. Esta amina cuaternaria tiene una basicidad más baja que la del tipo 1, sin embargo, es lo suficientemente alta para eliminar aniones ácidos débiles [71]. En general, este tipo de resinas intercambian iones negativos y requieren de una gran cantidad de regenerante [72].

3.1.2.ii.Osmosis inversa. Es un proceso con membranas en el que se debe aplicar una presión mayor a la presión osmótica que se ejerce sobre el compartimiento que contiene la concentración más alta de sólidos disueltos tales como iones. La presión ejercida obliga al líquido a pasar por la membrana semi-permeables en una dirección contraria a la del proceso convencional de ósmosis, dejando las impurezas durante el recorrido. Debido a la poca permeabilidad de la membrana, un gran porcentaje de impurezas, moléculas de sal, bacterias y virus son separados de la corriente de agua [74].

En estos sistemas el agua de alimentación se separa en dos corrientes: una con muy baja salinidad que se conoce como permeado o agua producto, y una con alta salinidad conocida también como concentrado, salmuera o rechazo. La cantidad de agua que fluye por las membranas es proporcional a factores como área superficial de la membrana, presión diferencial de alimentación-permeado y permeabilidad de la membrana [75].

**Figura 25.**

*Funcionamiento del proceso de ósmosis inversa*



**Nota.** Se muestra el esquema del funcionamiento del proceso de ósmosis y osmosis inversa. Tomado de: “¿Qué es la ósmosis inversa,” Carbotecnia. <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/osmosis-inversa/que-es-la-osmosis-inversa-purificador/> (accessed May 11, 2021).

Este proceso es capaz de remover del agua de alimentación hasta el 99% de las sales disueltas (iones), coloides, bacterias, partículas, entre otros. La membrana utilizada rechaza los contaminantes en función de su tamaño y cara, por ejemplo, cualquier contaminante que cuente con un peso molecular mayor a 200 será rechazado por un sistema de osmosis inversa que se encuentre funcionando correctamente. Por otro lado,

no elimina gases por lo que el agua de permeado puede presentar un nivel de pH más bajo de lo normal, este factor depende de los niveles de CO<sub>2</sub> en el agua de alimentación ya que este gas se convierte en ácido carbónico [76].

### **Tipos de membranas para ósmosis inversa**

La mayor cantidad de membranas para ósmosis inversa disponibles en el mercado corresponden a dos tipos: asimétrica de celulosa y compuesta de capa fina (TFC)

- **Membranas asimétricas:** Se sintetizan empleando el método de precipitación por inmersión, donde se obtienen membranas con una estructura anisotrópica, consistente en una capa superficial llamada “piel” y una subcapa porosa. Estas capas tienen la misma composición química y los polímeros que normalmente se utilizan para su síntesis son acetato de celulosa, triacetato de celulosa y diacetato de celulosa. “El método de precipitación por inmersión de fases, el cual también es llamado proceso por vía húmeda, y desarrollado originalmente por Loeb y Sourirajan, consiste en moldear a baja temperatura, -10°C, una disolución polimérica de concentración moderada. Posteriormente, se realiza una evaporación parcial del disolvente, seguida de una inmersión del sistema en agua con el fin de completar la inversión de fase; así se forma (por gelidificación) la capa primaria o piel, cuyo espesor suele oscilar entre 0,1 y 0,5 µm. Un tratamiento posterior, a temperaturas entre 70 y 90°C da origen a la subcapa porosa, que presenta huecos relativamente pequeños (0,1-0,5 µm). La capa superior determina el grado de transporte de masa, mientras que la capa porosa sirve como soporte mecánico” [77].

Durante el proceso de formación de la piel, el disolvente tiene a difundir hacia afuera la estructura, entre tanto el agua lo hace hacia adentro, considerándose, así como constituyente integral de estas membranas. Es por esta razón que deben permanecer húmedas y si se dejan secar se generan tensiones capilares internas que pueden hacer colapsar las paredes de los huecos [77].



- **Membranas de capa fina (TFC):** Bicapa formada en dos pasos. Durante la primera etapa de síntesis se forma la capa porosa no selectiva que es cubierta por una capa densa y delgada en la superficie. Estas dos capas tienen una composición química distinta.

Cada capa puede ser optimizada por separado teniendo en cuenta la función que desempeñan, es así como la capa densa y delgada puede ser optimizada por la combinación de flujo de permeado y rechazo de solutos, mientras que el proceso de optimización de la capa de soporte porosa se hace para maximizar su resistencia a esfuerzos de corte y compresión y minimizar la resistencia al flujo permeado. En cuanto a los materiales para la formación de las capas se tiene que “es posible utilizar una variada gama de compuestos químicos que pueden formar la capa superficial densa y delgada, incluidos polímeros lineales o de entrecruzamiento, los cuales pueden exhibir superior hidrofiliidad, que se traduce en una mayor permeabilidad de agua, y superior resistencia química en comparación con el uso exclusivo de polímeros lineales, además, la formación de membranas asimétricas está limitada al uso de polímeros lineales y solubles. Solo unos pocos polímeros lineales pueden lograr la correcta combinación de flujo de permeado y rechazo de solutos, las cuales por ejemplo son, acetato de celulosa y poliamidas aromáticas lineales” [77].

**Clasificación de acuerdo a su carga superficial:** Estas membranas pueden ser porosas o densas, con restos aniónicos o catiónicos que se encuentran fijos en la estructura de la membrana. La separación se da por la carga, quedan excluidos aquellos componentes que tengan la misma carga de la membrana, esto también depende de la carga y concentración de los iones de la solución, aquellos iones que son monovalentes son excluidos con menos efectividad que los divalentes [78].

**Clasificación según su naturaleza química:** Pueden ser de dos tipos, orgánicas o inorgánicas. Las membranas orgánicas son aquellas en las que la capa activa se encuentra fabricada a partir de un polímero o copolímero orgánico, los más usados son la celulosa, sus derivados y las poliamidas. Por otro lado, las membranas inorgánicas

son materiales cerámicos que tienen aplicaciones muy específicas como óxidos, nitruros, carburos de metales, entre otros [78].

**Clasificación según su forma:** Pueden prepararse de dos formas geométricas, planas y cilíndricas. Estas últimas, en base a las diferencias dimensionales pueden encontrarse como membranas tubulares con diámetro mayor de 3mm y membranas tubulares de fibra hueca con diámetro interno menor de 3 mm [78].

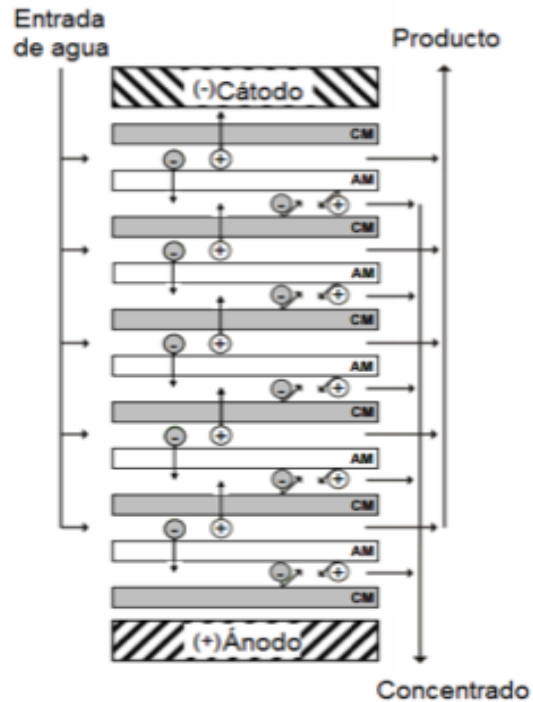
3.1.2.iii. Electrodiálisis. “Es una tecnología de membranas que permite, bajo influencia de un campo eléctrico continuo, extraer sustancias orgánicas e inorgánicas ionizadas disueltas en una disolución acuosa, a través de membranas selectivas” [79]. Este tipo de tratamiento está basado en el uso de membranas, por medio de las cuales se lleva a cabo la transferencia. Sin embargo, la peculiaridad de este proceso es que el transporte de una solución a otra a través de la membrana selectiva de iones es de especies de bajo peso molecular y no se lleva a cabo ninguna reacción química.

La aplicación de este sistema permite la eliminación de sales en alimentos, lácteos, soluciones y corrientes de desechos como las aguas de producción de un pozo petrolero, así mismo se puede emplear para concentrar sales, bases o ácidos [79].

Durante el proceso, se emplea una fuerza impulsora que permite transferir las especies iónicas presentes en la corriente de agua a tratar a través del cátodo y el ánodo a una corriente de concentrado, creando una corriente más diluida. Esta tecnología “elimina selectivamente sólidos disueltos, basándose en su carga eléctrica, transfiriendo los iones de agua salobre a través de la membrana de intercambio iónico semipermeable cargada con un potencial eléctrico” [80].

**Figura 26.**

*Principio de la electrodiálisis*



**Nota.** La figura representa el principio de funcionamiento del proceso de electrodiálisis donde AM representa la membrana aniónica y CM la membrana catiónica. Tomado de: R. Jarava Galván and I. P. Planeta Barros, "Análisis de Alternativas para la Remoción de Cloruros presentes en las Aguas Residuales Industriales de Producción del Campo Cicuco Ecopetrol S.A.," Universidad Nacional Abierta y a Distancia , Valledupar, 2017.

La corriente de alimentación para este sistema de tratamiento se separa en 3 tipos, agua de producto (baja conductividad y nivel de sólidos disueltos), salmuera o concentrado (recibe los iones de agua salobre) y agua de alimentación del electrodo (pasa directamente sobre los electrodos que crean el potencial eléctrico).

Entre las condiciones de operación que deben resaltarse está el consumo de energía que se requiere para producir la corriente constante, encargada de impulsar la purificación y el bombeo de la corriente a tratar. Además, se puede presentar un grado de dificultad en el cambio de las membranas y resinas. Estas variables limitan su funcionamiento cuando se excede una concentración límite de iones como cloruros ya que son directamente proporcionales a la cantidad de sales a separar [80].

Dentro de los componentes básicos de un módulo de electrodiálisis se tienen los siguientes:

**Electrodos:** Hacen referencia a materiales conductores de electricidad por medio de los cuales se verifica la transferencia electrónica con la disolución en la que se encuentran las sustancias que se desean transformar. En este proceso cumplen con la única función de proporcionar el campo eléctrico y pueden ser ánodos dimensionalmente estables (DSAs) como aquellos elaborados con óxidos metálicos o Pt/Ti (platino soportado sobre titanio) como ánodos y como cátodo el acero inoxidable.

Con el fin de disminuir la ocurrencia de reacciones sobre estos elementos, se debe llevar a cabo un lavado con electrolitos como el sulfato de sodio, ya que no se electroliza bajo las condiciones de trabajo. Además, es importante resaltar que “las soluciones de lavado de ambos electrodos se mantienen separadas, pero por lo general estas dos corrientes se mezclan para compensar la diferencia de pH generada por las reacciones electrónicas, del mismo modo, se le adiciona ácido a dicha solución para evitar la precipitación de calcio y magnesio” [79].

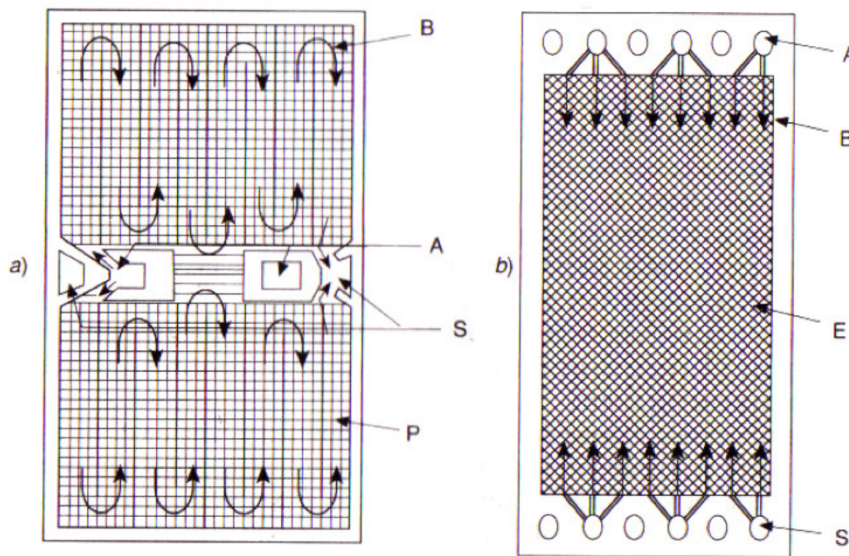
**Membranas:** Para el tratamiento por electrodiálisis se utilizan membranas de intercambio iónico que están formadas por sustancias sólidas de intercambio, están constituidas por cadenas poliméricas orgánicas que tienen un elevado peso molecular y

se encuentran unidas por un enlace iónico con un catión, es decir, resinas catiónicas, o un anión, resinas aniónicas [81].

**Espaciadores:** Materiales plásticos de polietileno o poliéster que se encuentran en forma de malla. Este elemento se dispone entre cada par de membranas y se encarga de sellar las celdas, soportar las membranas, proporcionar los canales de flujo por medio de los cuales pasan las disoluciones y actúan como promotores de turbulencia, además de controlar la distribución de flujo. Existen 2 tipos de espaciadores, de flujo laminar o turbulento, como se muestra en la siguiente imagen [79].

**Figura 27.**

*Tipos de espaciadores*



**Nota.** La figura representa los dos tipos de espaciadores que se emplean en el proceso de electrodiálisis, donde a) es el de flujo tortuoso y b) de flujo laminar. Tomado de I. Medina, "Tratamiento de aguas de producción con electrodiálisis," Universidad de los Andes, Mérida, 2007.

La figura 23a es el espaciador de flujo turbulento y 23b de flujo laminar, donde A es la entrada de la disolución de alimentación, B es el camino que sigue el flujo, E es la malla espaciadora de plástico, P son los promotores de turbulencia y S representa la salida de la disolución.

**Juntas:** Cumplen con la función de evitar fugas de electrolitos en la celda, ya que esto puede generar complicaciones durante el proceso como cortos circuitos. Además, evita que se mezclen las corrientes que fluyen por los compartimientos (concentrados y diluidos). Estos elementos deben poseer una alta estabilidad química y resistencia mecánica, estas propiedades se deben cumplir con el menor espesor posible, para minimizar la distancia intermembránica y así el consumo energético [79].

### **3.2. Análisis de la eficiencia de tratamientos de agua según casos de estudio teniendo en cuenta los criterios establecidos para la tecnología a proponer en vertimientos termales**

Es importante considerar casos de estudios realizados previamente para el control de los iones cloruros y sulfatos en las corrientes de agua, principalmente cloruros, que sirvan de referentes para la toma de decisiones. En cada uno de estos se tendrá en cuenta la descripción del proceso y todas aquellas consideraciones relevantes para su posible implementación y los resultados obtenidos. La información a continuación fue extraída de bases de datos como, Scielo, ScienceDirect, Google Académico, ResearchGate y Repositorios.

#### **3.2.1. Adsorción de iones cloruro en vertimientos utilizando carbón activado comercial**

En el proyecto de grado "*Determinación de la cinética de adsorción de cloruros de vertimientos del sector agrícola cultivos energéticos, sobre carbón activado comercial*" realizado por Laura Daniela Arroyo y Diana María Ruiz, realizaron pruebas de adsorción mediante un desarrollo experimental para disminuir los contaminantes de los vertimientos de la extracción de aceite de palma. Este proceso genera vertimientos con presencia de cloruros, la industria palmera en el país genera efluentes con una concentración promedio de 1360mg/L de cloruros según Cenipalma [53]. Con el fin de disminuir la

concentración de iones cloruros y cumplir con la normatividad colombiana, en esta investigación se utilizó el carbón activado granular para adsorción de estos iones, y por medio de evaluaciones de modelos e isothermas de adsorción se establecieron condiciones óptimas para hacer efectivo este tratamiento.

El proyecto se enfocó en la planta extractora de palma de aceite Hacienda La Cabaña al noroccidente del departamento del Meta, esta planta tiene una capacidad de procesamiento de 30 ton/año, sus vertimientos los cuales tienen altas concentraciones de iones cloruros, son usados para el riego de sus propios cultivos lo cual perjudica el crecimiento vegetal [53].

Para el uso del carbón activado como tratamiento de aguas con alta concentración en iones cloruros, se tuvieron en cuenta parámetros de adsorción con el fin de establecer condiciones favorables que maximicen el aprovechamiento del adsorbente. El estudio se realizó a temperatura ambiente ( $20^{\circ}\text{C}$ ), se planteó un pH de 5, 6 y 7, una relación S/L de 12,5 g/l, en cuanto al tiempo de equilibrio de adsorción, según su revisión bibliográfica se especificó que el tiempo en el que el adsorbente y el adsorbato llegan al equilibrio se establece a partir de 24 horas de contacto entre la solución y el carbón activado granular (CAG), sin embargo, la poca información de este método llevo a elegir dos tiempos experimentales de 24 y 30 h.

Su experimentación se basó en el proceso de adsorción el cual se basa en que las fuerzas de enlace, entre los centros activos del adsorbente no se deben encontrar saturadas, y así permitir la retención de iones cloruro sobre el carbón activado, cuya naturaleza difiere a la del compuesto a retener, por lo tanto, este se acumula en la interfase. Esto ocurre en tres etapas, iniciando por la transferencia del soluto desde la fase líquida hacia el carbón activado granular, luego se realiza una transferencia del soluto hacia la superficie de la matriz carbonada generando difusión del soluto en el carbón activado, lo que se denomina adsorción.

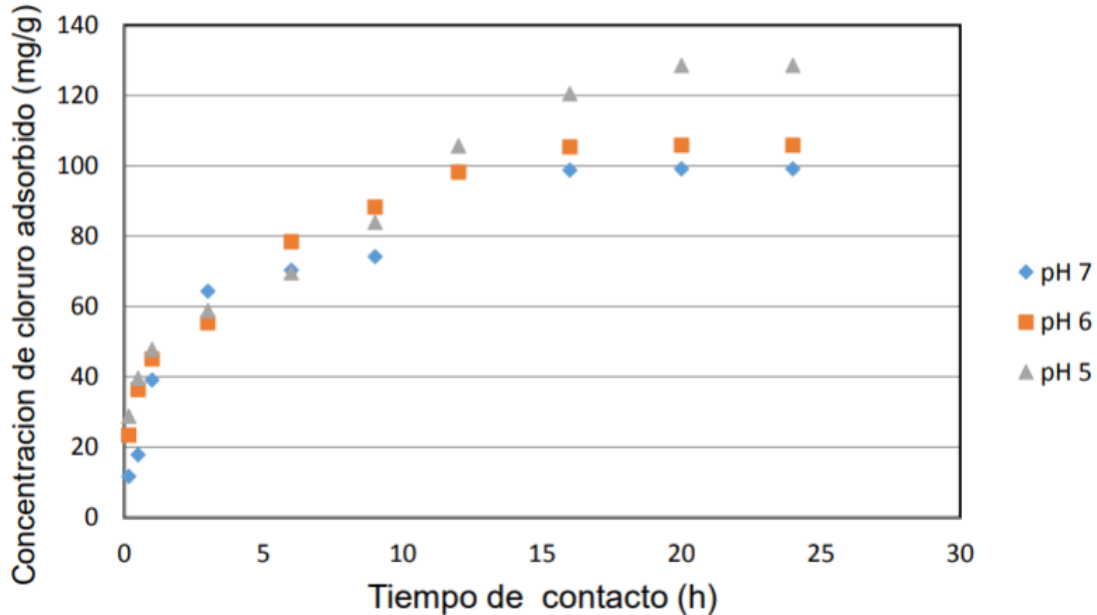
Se utilizó el CAG de la industria Carbochem (CAG-LQ 900S) ya que cumple con la mayoría de las normativas dadas por la ASTM y es el que aprovecha en mayor cantidad la superficie del absorbente, cuenta con un área superficial de 542,44 m<sup>2</sup>/g , densidad aparente 0,48 g/cc, volumen de mesoporo 0,47 cm<sup>3</sup>/g y pH de 7,1 [53].

Para el desarrollo experimental del proyecto se tomó un caudal 3,04 L/s y concentración promedio de cloruros de 813,05 mg/L. Más adelante, para determinar el tiempo de equilibrio, se realizó una gráfica en donde se encontró una no variación en un tiempo determinado de 3 valores de pH, por lo que se estableció un tiempo de 20 horas para que la solución entre en contacto con el carbón activado, se estabilice y se ocupen todos los sitios activos del CAG.



**Figura 28.**

*Determinación del tiempo de equilibrio en la adsorción de Cl<sup>-</sup> sobre carbón activado a diferentes valores de pH*



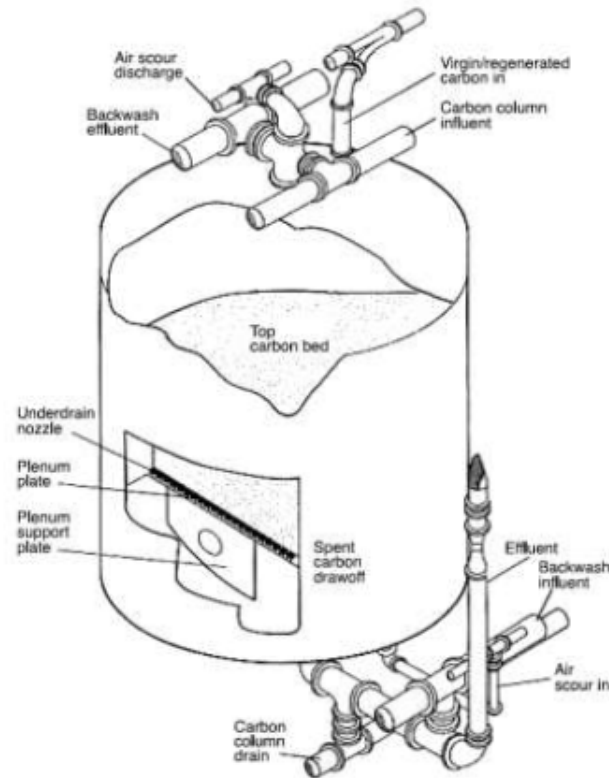
**Nota.** En la figura se observa la concentración de iones cloruro adsorbidos sobre la superficie del adsorbente en función del tiempo en horas. Tomado de L. D. Arroyo Ramirez and D. M. Ruiz Rivera, “Determinación de la cinética de adsorción de cloruros de vertimientos del sector agrícola cultivos energéticos, sobre carbón activado comercial,” Fundación Universidad de América, 2018.

Después de la determinación del tiempo de equilibrio, se calcularon los porcentajes de remoción de cloruros que presentó el CAG LQ-900S, al comparar el pH de la solución. Se observó que los pH entre 5-6 favorecen los fenómenos de adsorción, siendo el menor el de mayor porcentaje de remoción de iones cloruro con un 84,5%. El tipo de carbón activado seleccionado, el cual cuenta con un pH de 7,1 adsorbe mayor cantidad de iones cloruro debido a sus grupos básicos que interactúan con los iones con mayor facilidad y a también debido al carácter ácido de la solución.

Finalmente, con la condición inicial de concentración de cloruros de 813,05 mg/L, se evidencio que la remoción de cloruros se ve favorecida a concentraciones iniciales altas y medias, ya que en las bajas concentraciones de iones cloruros los sitios activos del CAG no interactúan adecuadamente con estos.

**Figura 29.**

*Filtro de CAG con flujo descendente en un tanque a presión*



**Nota.** En la figura se observa el lecho filtrante de carbón activado, su sistema de transporte y su sistema de regeneración. Tomado de A. J. Burgos, J. Suárez López, and P. Ures Rodríguez, “Adsorción en carbón activo (FT-TER-002),” 2014. Accessed: Jun. 09, 2021. [Online]. Available: <https://www.wateractionplan.com/documents/177327/558161/Adsorción+en+carbón+activo.pdf/29bfa658-fbd1-c98b-1606-8eb1252fc1b9>.

Normalmente, para el tratamiento de aguas residuales los CAG se utilizan en filtros de lecho fijo, expandido o fluidizado. Para lecho fijo, estos pueden trabajar

a gravedad o a presión, el carbón en el interior del tanque requiere lavados para prevenir la acumulación de una excesiva pérdida de carga y evitar la obstrucción de la superficie del filtro [82].

### **3.2.2. Adsorción de iones cloruro utilizando carbón activado de conchas de coco modificado**

Al igual que la adsorción de iones cloruro en CAG comercial, esta alternativa presenta las mismas ventajas, pero tiene un alcance mayor a la hora de hablar de impacto ambiental. El origen del carbón activado puede venir de diferentes materias primas como vegetal, material lignítico, material bituminoso, cáscara de coco, etc [53]. De estos la cáscara de coco es la materia prima para CA con mayor proporción de microporos, lo que quiere decir que es adecuado para retener moléculas de un tamaño muy pequeño, que es este caso serían, iones.

En el documento “*Características fisicoquímicas del carbón activado de conchas de coco modificado con HNO<sub>3</sub>*”, realizado por Mónica Hernández, Alexis Otero, José Falcón y Yan Yperman, se evalúa como influye la modificación del CA de conchas de coco con soluciones diluidas de ácido nítrico en las características fisicoquímicas y en la formación de grupos superficiales ácidos oxigenados, que permitan una posterior adsorción de contaminantes [60]. En este estudio se escoge el ácido nítrico para hacer la tarea de potenciar la formación de grupos superficiales ácidos y mejorar el desempeño del CA.

En cuanto al pH, un parámetro el cual es clave en la adsorción de iones cloruro, posee un carácter básico con un pH de 10 y disminuye su pH al tratar con soluciones de HNO<sub>3</sub> de mayor concentración. Esta modificación química del material también incrementa los grupos superficiales ácidos lo cual promueve esta disminución de pH, también causa, cenizas y un contenido de compuestos solubles en agua y en ácido de acuerdo con el incremento de la concentración de la solución oxidante, en este caso HNO<sub>3</sub> [60]. El parámetro de humedad se relaciona con el carácter hidrófilo y la disminución del pH en el punto de carga cero, lo cual es positivo para utilizar como adsorbente de cationes presentes en soluciones acuosas.

No obstante, los pocos estudios de materias primas amigables con el medio ambiente, las cuales originen CA con propiedades adsorbentes para moléculas muy pequeñas, no cumplen con los suficientes requerimientos para implementar tratamientos con este inmediateamente en esta investigación, siento una excelente alternativa para prevenir cualquier impacto ambiental requiere de más estudios que la apoyen.

### **3.2.3. Remoción de iones cloruro en efluentes utilizando fibras de fique naturales y modificadas químicamente**

En el estudio denominado “*Evaluación de la remoción de sales por medio del uso de fibras de *Furcraea bedinghausii* (fique) y fibras de fique modificadas químicamente*”, por Nikolay Agudelo y Jhonna Husserrl, se evaluó las fibras de fique natural y fique modificado químicamente como posibles materiales para la remoción de iones como  $Cl^-$ . Uno de los parámetros más significativos en este análisis fue el efecto del pH sobre la capacidad de adsorción, gracias a este y otros parámetros, como las isothermas de adsorción las cuales relacionan la cantidad adsorbida por el sólido con la concentración del material en la solución, se identificó una mayor capacidad de adsorción en el fique modificado, ya que estos en el proceso incrementan su capacidad natural de retención de posibles contaminantes que poseen los MDA.

El estudio inicio por la posibilidad de usar los Materiales de Desecho Agrícolas (MDA) en procesos de adsorción e intercambio iónico para el tratamiento de aguas residuales, ya que esta es una propuesta de bajo costo y proviene de una fuente renovable lo que confirma, disponibilidad del material. El procedimiento con mayores ventajas, modificación química, realizo un incremento en la cantidad de lugares activos sobre el material lo cual, aumento su capacidad de adsorción. Para esto se necesitó la oxidación de la lignina, celulosa y hemicelulosa del material con peróxido de hidrogeno, posteriormente con ácido cítrico se ligaron los sitios activos y finalmente con trietilamina se incrementaron los puntos de unión entre aniones y el adsorbente [61].

Para utilizar el fique como material adsorbente, se debe tener en cuenta que posteriormente se realiza una preparación previa del material y una modificación de este, lo que aumenta los costos en comparación con el fique natura.

Esta experimentación se enfocó en las aguas de producción petrolera, las cuales tienen un alto contenido de salinidad, en especial de presencia de iones como  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4$ . En la experimentación se contó con un rango de concentración entre 1370 - 22500 mg/L para cloruros y 276 – 1840 mg/L para sulfatos, a la hora del proceso de adsorción se evidenció una eficiencia mayor al utilizar valores de pH alcalinos, sin embargo, no fue tan significativa la variación entre estos dos iones especificados anteriormente [61].

En cuanto a las isotermas para los iones cloruros, el equilibrio se ajustó al modelo de Freundlich, lo cual quiere decir que la adsorción de este ion forma una película simple de adsorción con una distribución energética heterogénea de lugares activos acompañada de la interacción entre las moléculas adsorbidas [61]. Lo anterior confirma la capacidad de retención de iones  $\text{Cl}^-$  en materiales de origen vegetal, y la siguiente tabla verifica esta información.

**Tabla 6.**

*Comparación de las capacidades de adsorción de otros materiales y las obtenidas con fique modificado*

Ion	$q_e$ (meq g <sup>-1</sup> ) (este estudio)	$q_e$ (meq g <sup>-1</sup> ) (literatura)
Cloruro	≈8	3.05 (hidróxidos dobles laminares)
		3.15 (resinas de intercambio iónico)
Sodio	≈8	0.18 (bagazo de caña modificado con EDTA)
Sulfato	≈0.9	3.16 (resina de intercambio)
		0.39 (cascarilla de arroz modificada)
		0,64 (cáscara de coco)
Calcio	≈1.5	0.32 (zeolita modificada con A. sulfúrico)
		0.18 (bagazo de caña modificado EDTA)
		0.95 (resina de intercambio iónico Amberlite IRC 748)
		2.85 (pómez natural)
Magnesio	≈8	0.85 (bagazo de caña modificado EDTA)
		0.52 (zeolita modificada con A. sulfúrico)
		0.6 (tratamiento con resina de intercambio iónico y ultrasonido)
		0.021 (zeolita natural)
		3.66 (pómez natural)

**Nota.** Esta tabla presenta la comparación de los resultados de adsorción e intercambio iónico encontradas para otros materiales comparado con los resultados del estudio de MDA como materias primas para los procesos mencionados anteriormente. Tomado de N. Agudelo and J. Husserrl, “Evaluación de la remoción de sales por medio del uso de fibras de *Furcraea bedinghausii* (fique) y fibras de fique modificadas químicamente.”

La figura anterior, evidencia la capacidad del fique modificado químicamente como adsorbente. Esta es una gran propuesta, pues contamos con buenos cultivos de fique en el país, el empleo de esta fibra disminuye costos asociados a la obtención de carbón y permite generar un valor agregado al MDA.

### **3.2.4. Remoción de iones cloruro en efluentes utilizando hidrotalcitas**

El estudio con nombre “*Remoción de iones cloruro presentes en efluentes utilizando hidrotalcitas como materiales adsorbentes*”, realizado por María Cristina Colmenares y

Emily Mare, evidencio la capacidad de remoción de iones cloruro que tienen las hidrotalcitas calcinadas, especialmente usando óxidos de magnesio que remueve un 96% de estos contaminantes en los efluentes. Esta experimentación se fundamentó en parámetros como pH de solución, tiempo de agitación y dosis de hidrotalcira calcinada, estos contribuyeron a la confirmación de que los óxidos de las hidrotalcitas son más eficientes en la remoción de iones cloruro que los hidróxidos, siendo los óxidos de magnesio los más eficientes por su mayor porosidad [63].

Una de las razones por la cual estos estudios son tan importantes a nivel agropecuario, es por el hecho de que un gran porcentaje de los efluentes que son utilizados en riego de cultivos vienen contaminados con altos niveles, en este caso, de cloruros [63]. Por consiguiente, genera una reducción de la calidad en el cultivo como, por ejemplo, la disminución de materia seca en tubérculos de papa, reducción de sacarosa extraíble en la caña de azúcar, entre otros. Igualmente, la corrosión en tuberías de metal, acero o hierro son efectos de las altas concentraciones de este ion.

El uso de este tipo de arcillas logra eliminar algunos contaminantes, como cloruros, gracias a su efecto de memoria que le potencializa su capacidad como adsorbente.

En esta experimentación se trabajo con un efluente con pH de 5 y una concentración de iones cloruro de 222mg/L. Luego de conocer a fondo las estructuras de las hidrotalcitas, se evidencio que la hidrotalcita calcinada de MgAl presento un mayor porcentaje de remoción, lo cual corrobora la excelente capacidad de las arcillas en los procesos de adsorción, sin dejar de lado las condiciones que mejoran su propiedad adsorbente condiciones como el pH neutro, tiempo y dosis, todo estos para hidrotalcitas calcinadas de magnesio.

### ***3.2.5. Extracción de sulfatos por medio de intercambio iónico en la industria metalúrgica***

Este tipo de tecnología se ha aplicado en diferentes industrias como la metalúrgica, donde las corrientes residuales también cuentan con un alto contenido de compuestos

contaminantes como los sulfatos, que es uno de los principales problemas planteados en este trabajo. Considerando investigaciones anteriores, por medio de las resinas IRA-400 e IRA-420, que son de tipo alcalinas fuertes, acondicionadas con NaOH fue posible llevar a cabo el control de sulfatos en efluentes acuosos mineros.

Para este estudio se tuvo en cuenta factores como la carga máxima de sulfatos que cada una de las resinas podía retener, la velocidad del intercambio iónico, la eficiencia de la descarga para diferentes concentraciones de agente re-extractante y el comportamiento que tienen las resinas en un test cíclico de carga-descarga. Por medio de las isotermas de extracción, que representa el balance de masa entre la resina y la solución acuosa y se obtiene experimentalmente al momento de hacer sucesivos contactos entre la resina y la solución, donde se debe variar el volumen de solución que entra en contacto y cuenta con una concentración constante de iones y el volumen de la resina que se utiliza, fue posible determinar que con ambas resinas se puede extraer prácticamente el 100% de los sulfatos presentes en el agua.

Es importante tener en cuenta que se trabajaron 2 concentraciones, 1000 y 2000 ppm de sulfato, y de la isoterma de extracción de esta última fue posible deducir que el pH puede afectar la capacidad de extracción en las dos resinas. Conforme aumenta la concentración de sulfatos en la resina el pH disminuye. De acuerdo a la cinética de extracción, en tiempos menores a 5 minutos se logra alcanzar aproximadamente el 80% del equilibrio, esto permitiría tratar grandes volúmenes de agua sin la necesidad de emplear equipos con grandes volúmenes de reacción. Considerando todos los factores expuestos, es posible considerar que esta tecnología es eficiente para la remoción de los iones sulfatos en las corrientes a tratar [83].

### ***3.2.6. Intercambio iónico como pretratamiento para aguas de procesos de producción de aceite***

En los procesos de producción de aceite de oliva o relacionado con plantas oleaginosas, debido al sistema de dos o tres fases de centrifugación “se han incrementado considerablemente la cantidad de afluentes derivados de la industria del aceite, que



consisten en aguas residuales de la vegetación del olivar (OVW) y aguas residuales del lavado de aceitunas (OWW), denominadas en conjunto aguas residuales de almazara (OMW)". Estas corrientes de desecho también cuentan con una concentración elevada de cloruros, así como sodio, hierro total y fenol.

Para esta industria, el intercambio iónico se considera un pretratamiento, que permite evitar el desgaste y ensuciamiento de las membranas que se utilizan en etapas posteriores del proceso de tratamiento. Para la evaluación de la eficiencia del intercambio iónico, en este caso de estudio, se manejan concentraciones de 1130 mg/L y 730 mg/L de cloruros y sodio respectivamente, así como 1 mg/L y 0,4 mg/L para fenol y hierro total.

Las resinas empleadas en este caso fueron de intercambio catiónico de ácido fuerte Dowex Marathon C (346 g) y de intercambio aniónico de base débil Amberlite IRA-67 (350 g), y se manejaron dos columnas conectadas en serie. En este proceso se preparan las resinas con un lavado utilizando agua MilliQ®, con el fin de crear la fluidización del lecho y la expansión de la resina a lo largo de la columna. En cuanto a la regeneración de las resinas se tiene que "después de cada ciclo operativo, la resina de intercambio catiónico Dowex Marathon C, se lavó completamente con una solución acuosa de HCl al 2% durante 30 minutos a 298 K. De manera similar, la resina de intercambio aniónico Amberlite IRA-67 se lavó con una solución acuosa de NaOH al 4% durante 40 minutos a 298 K. Luego, las resinas se lavaron con agua bidestilada para eliminar el exceso de ácido o base, respectivamente" [84].

De acuerdo con los resultados obtenidos, el uso de la resina de intercambio catiónico seguida de la resina de intercambio aniónico dio mejores resultados que si se implementa de forma contraria. Por otro lado, una vez alcanzado el equilibrio después de 30 minutos, las eficiencias de eliminación fueron superiores al 90%. Este proceso de tratamiento comúnmente se hace por lotes, sin embargo, al hacerlo de forma continua los porcentajes de remoción para iones cloruro son del 90% a una temperatura óptima de 298 K hasta la primera hora de operación [84].

### **3.2.7. Intercambio iónico y osmosis inversa para remoción de cloruros en aguas residuales de la industria petrolera**

En la industria petroquímica, debido a los procesos involucrados, se generan corrientes de desechos que pueden contar con un alto nivel de contaminantes, afectando así al medio ambiente. Por esta razón, también se cuenta con tecnologías que permitan el tratamiento de estos contaminantes, más específicamente para este caso en corrientes hídricas. Al igual que en las corrientes residuales de las piscinas termales, se encuentran concentraciones de iones cloruro que deben ser tratadas antes de realizar el vertimiento en el cuerpo de agua receptor. Así como en el caso expuesto anteriormente, el intercambio iónico representa una alternativa eficiente para la eliminación de iones cloruro en las corrientes a tratar, considerando las características descritas de las resinas que se emplean en este tratamiento.

En este segundo caso de estudio se evaluaron los aspectos más relevantes a considerar sobre la implementación de este tratamiento, se destaca que es posible alcanzar una eficiencia mayor al 80% en la remoción de iones, solo se requiere de la automatización de paso del caudal a tratar, las resinas que se emplean son estables químicamente, tienen una larga duración y los procesos de regeneración son sencillos. Además, solo se requiere el consumo de energía para el bombeo del agua en el caso de una implementación a gran escala y el total del agua es tratada de un solo paso [80].

En cuanto a aquellos factores que pueden limitar el funcionamiento del intercambio iónico se encuentra que se debe tener mayor grado de cuidado para evitar fallas por un mal procedimiento, no se eliminan bacterias, sustancias orgánicas o partículas, se genera un aumento en los costos debido al consumo de regenerantes y si el caudal de alimentación es muy grande ya que se requiere el uso de un mayor volumen de resina. Por último, es importante tener presente la salinidad del agua, ya que puede limitar el funcionamiento de las resinas [80].

También es posible considerar otro tipo de tratamientos terciarios como segunda opción para su implementación. Uno de ellos es osmosis inversa, que para este mismo campo de aplicación en la industria petroquímica cumple con el objetivo de remoción de iones

cloruro en el agua. Entre las ventajas de este tipo de tratamiento se encuentra que utiliza membranas semipermeables que pueden trabajar a altas y bajas concentraciones de salinidad y retiene un gran porcentaje de elementos minerales, químicos y materias coloidales, es un proceso continuo ya que solo se requiere hacer paradas para adelantar un mantenimiento preventivo del sistema, no requiere de grandes áreas para su implementación, es un proceso limpio sin efluentes ácidos o alcalinos [80].

Por otro lado, en cuanto a las desventajas de este proceso se tiene que se genera una reducción del pH en la corriente de salida por lo que es necesario implementar un post-tratamiento, con el fin de optimizar el proceso es necesario hacer un pre tratamiento ya que la calidad del agua de salida es dependiente de la calidad del agua de alimentación. Además, algunos minerales beneficiosos también son retirados durante el tratamiento, si el porcentaje de eficiencia baja del 90% es necesario hacer mantenimiento a las resinas y por último los gastos por energía consumida aumentan, considerando que se debe superar el valor de la presión osmótica [80].

Por medio de una simulación mediante el software Winflows, fue posible determinar que, con el proceso de osmosis inversa utilizando el sistema SEA PRO E-210 que consta de 16 cilindros, cada uno con 6 unidades del filtro o membrana para un total de 96 filtros, se presenta una disminución en la concentración de iones cloruro de 7366 ppm hasta 45,89 ppm (99,4%). Este sistema opera bajo presiones de operación de 400-800 psi, un rango de temperatura de 15-32°C, capacidad máxima de retención de TDS de 47000 ppm, un rango de caudal de 600-900 gpm y una presión de entrada de 30 psi. Por medio de la simulación se estableció que la temperatura óptima de trabajo fue de 37,75°C, permitiendo operar a una presión menor [80].

Con el fin de mantener el pH del sistema en 7,0, se utiliza un tratamiento de soda caustica (NaOH) después de la alimentación y a la salida de una de las corrientes denominada permeado y para evitar las incrustaciones que disminuyen la eficiencia del tratamiento se utiliza un tratamiento antiescalante. Por último, se plantea un sistema de recirculación del 50% de la corriente de concentrado [80].

### **3.2.8. Remoción de sulfatos en corrientes de la industria minera por tecnología de membrana (ósmosis inversa)**

Considerando la técnica de osmosis inversa como otra posible solución al problema de concentración de iones sulfato en las corrientes de desecho, se tendrán en cuenta estudios realizados en efluentes de la industria minera para la reducción de este componente. Con este tipo de tratamientos es posible lograr un rechazo de hasta el 99% de iones sulfato y dependiendo de la calidad del agua de alimentación, se puede lograr un contenido de sulfatos de 10 mg/L mediante tecnologías de membrana. Debido a las dificultades por incrustaciones de sulfato en las membranas, se debe considerar la implementación de un tratamiento previo que disminuya la concentración de estos iones, como la precipitación con yeso.

La experimentación se llevó a cabo en una unidad de filtración de laboratorio, bombeando la solución desde el tanque de almacenamiento con un área de membrana de 140 cm<sup>2</sup>. Se emplearon membranas de nanofiltración y osmosis inversa (BW30LE), sin embargo, solo se tendrán en cuenta los resultados obtenidos del tratamiento con osmosis inversa. En cuanto a la preparación del material se tiene que “las láminas planas de membrana se enjuagaron antes de las filtraciones con agua desionizada y se almacenaron durante la noche a 5°C en una botella de vidrio llena de agua desionizada. Los rechazos de sal a 2.000 ppm se determinaron en base a las medidas de conductividad del permeado a pH 8 y con una recuperación del 15% utilizando sulfato de magnesio (MgSO<sub>4</sub>) y una presión de 5 bar para la membrana NF, y cloruro de sodio (NaCl) y una presión de 10 bar para la membrana RO.”

Los resultados obtenidos en este estudio indican que la concentración de sulfato en el permeado, después del proceso de osmosis inversa, fue del máximo de 23 mg/L, además también eliminó el cloruro presente en la corriente de agua. La recuperación de agua para este proceso fue del 60% aproximadamente, con un flujo de 30 L/m<sup>2</sup>h. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el concentrado que se forma durante la purificación debe tratarse por la acumulación de iones contaminantes. Por último, se debe tener cuidado con la temperatura de la corriente de alimentación ya que este es un factor que afecta el rendimiento del proceso [85].

### **3.2.9 Remoción de iones cloruros en aguas residuales de desulfuración de gases**

Las aguas residuales generadas durante los procesos de desulfuración de gases de combustión húmeda de piedra caliza-yeso cuentan con una alta concentración de iones cloruro, dificultando así su tratamiento. Por medio de un tratamiento electrolítico-electrodiálisis es posible dar solución a este problema, obteniendo como resultado  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{H}_2$  y  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Para este caso, antes de ingresar la corriente a la cámara de electrodiálisis se lleva a cabo un pre tratamiento y el ensuciamiento se evitó controlando la concentración de  $\text{Ca}(\text{OH})$  de la cámara de electrólisis catódica [86].

La experimentación se llevó a cabo a nivel laboratorio, donde se empleó un aparato de electrodiálisis - electrólisis de triple cámara utilizando una corriente que simula las características del agua de desulfuración, que en este caso es una solución de  $\text{CaCl}_2$ . Se tiene en cuenta que la cámara de electrólisis catódica y de electrodiálisis central fueron separadas por una membrana de intercambio catiónico (JCM-II) y la cámara de electrólisis anódica y de electrodiálisis central fueron separadas por una membrana de intercambio aniónico (JAM-II). Dentro de las especificaciones que se tienen en cuenta que el área efectiva de las membranas fue de  $64\text{m}^2$ , el ánodo y cátodo están recubiertos de titanio puro y base de titanio rutenio-iridio-titanio, respectivamente y el espaciamiento entre las placas anódica y catódica es de 10 cm. Además, se utilizó un agitador para los electrolitos en las tres cámaras y la fuente eléctrica fue de alimentación de corriente continua de alta precisión [86].

Para este caso, la eficiencia de remoción es de 83,3% siempre y cuando la concentración de cloruros sea de 19,2 g/L y en la cámara catódica se mantenga en 9,6 g/L. Para este tipo de tratamiento, la densidad de corriente y concentración de  $\text{Cl}^-$  son factores determinantes, ya que determinan la eficiencia de la corriente, el voltaje requerido y el consumo de energía [86].

En cuanto al intercambio iónico, las resinas empleadas tanto para la remoción de iones sulfato como cloruros en corrientes de agua presentan una gran eficiencia. Para este tipo

de tratamiento es de gran importancia tener en cuenta factores como: la concentración inicial del componente que se desea retirar en la corriente a tratar, el agente regenerante que se emplea cuando las resinas de intercambio cumplen con el ciclo operativo, el tiempo en el que se consigue el equilibrio del sistema que garantice el buen funcionamiento, la temperatura de operación durante el proceso ya que se pueden presentar afectaciones a las resinas si se supera el valor establecido por el fabricante y el caudal de alimentación que se trabaje durante la experimentación.

De acuerdo a estos factores, la temperatura de operación puede ser un limitante al momento de la implementación del tratamiento de intercambio iónico, ya que si la temperatura es muy elevada se ve afectada la capacidad de retención de las resinas. Sin embargo, considerando que para la operación de las piscinas termales se lleva a cabo la adecuación de esta variable, no representaría una restricción en cuanto a la implementación del tratamiento. Por otro lado, el objetivo principal es la reducción de la concentración de iones sulfatos y cloruros mas no su eliminación, por lo tanto, esta alternativa representa una opción viable en cuanto a la eficiencia esperada.

Considerando otro factor importante para la implementación de este tratamiento, no se requiere de una estructura muy avanzada o compleja, ya que no se manejan caudales como en otras industrias que requieren este mismo sistema. Se debe tener en cuenta que, a pesar de tener requerimientos de espacio y estructura mas sencillos, es necesario garantizar el buen funcionamiento y condiciones de operación. Además, en caso de implementar dos resinas con características diferentes, es decir, aniónica y catiónica, los requerimientos tanto económicos, de materias primas y energéticos aumentan.

De la información presentada se destaca que las resinas IRA 402 y Amberlite IRA 67 presentan características de funcionamiento similares y se presenta una variación en la capacidad que tiene cada una para llevar a cabo el intercambio, ya que ambas son del tipo Amberlite. Para la selección de la mejor opción entre las resinas estudiadas y que se resumen en la tabla 6, es necesario tener en cuenta factores como disponibilidad, costo de adquisición, vida útil, capacidad de intercambio, agente regenerante y volumen de presentación.

Para la adquisición de este tipo de resinas es necesario contactar con un proveedor externo o solicitar bajo pedido, ya que no se cuenta con disponibilidad dentro del territorio colombiano para entrega inmediata.

A continuación, se resumen algunas características importantes de las resinas, membranas y sistemas, presentados en los casos de estudio para los tres tratamientos terciarios.

**Tabla 7.**

*Características de resinas de intercambio iónico*

<b>Tipo de resina</b>	<b>Características</b>	<b>Capacidad</b>
IRA-420 [88]	Resina de intercambio aniónico de base fuerte. Cuenta con una estructura de poliestireno reticulado, diseñada para tener un equilibrio óptimo de capacidad y eficiencia de regeneración. Profundidad mínima de lecho: 700 mm Temperatura máxima de operación: 60 °C Regenerante: NaOH Tiempo mínimo de contacto: 30 minutos	≥ 1,20 eq/L
Amberlite IRA67 [89]	Resina de intercambio aniónico de base débil que tiene una matriz acrílica de tipo gel. Cuenta con una alta capacidad, excelente estabilidad física y resistencia a las incrustaciones orgánicas, cinética rápida y basicidad superior a las resinas poliestirénicas de base débil. Profundidad mínima de lecho: 700 mm Temperatura máxima de operación: 60 °C Regenerante: NaOH Tiempo mínimo de contacto: 30 minutos	≥ 1,60 eq/L

Dowex Marathon C [90]	Resina de intercambio catiónico de ácido fuerte de tamaño de partícula uniforme que está diseñada para aplicaciones industriales y residenciales. Tiene una cinética rápida, mayor eficiencia de regeneración, mayor capacidad operativa y menor uso de regenerante.  Temperatura máxima de operación: 120°C Profundidad mínima de lecho: 800 mm Regenerante: H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (1-8%), HCl (8-12%) o NaCl (8-12%)	1,8 eq/L
-----------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------

**Nota.** La tabla muestra características relevantes de las resinas de intercambio iónico utilizadas en los casos de estudio revisados.

En cuanto al proceso de ósmosis inversa, la reducción de iones cloruro alcanza un porcentaje mayor al 95% por medio del sistema SEA PRO E-210, sin embargo, los resultados fueron obtenidos por medio de una simulación. En caso de seleccionar esta alternativa de tratamiento, es necesario llevar a cabo la experimentación para corroborar los resultados y asegurar que se cumpla con el objetivo principal del proyecto. Es importante resaltar que para la selección de el mejor sistema de ósmosis inversa se tienen en cuenta factores como el rango de aceptación de sólidos totales disueltos (TDS), el caudal de entrada, presión de entrada mínima y temperatura de operación.

Para la alimentación de la corriente a tratar al sistema se requiere de equipos auxiliares como bombas, por lo que se debe tener en cuenta los requerimientos de energía y combustible para su funcionamiento. Este factor interfiere en el aumento de los costos totales para la implementación del tratamiento.

Para la reducción de iones sulfato por medio de esta técnica, al utilizar la membrana BW30LE fue posible recuperar 60% del agua tratada durante la experimentación. Para este caso es de gran importancia tener en cuenta la temperatura de la corriente, ya que



afecta el rendimiento que tiene la membrana de ósmosis inversa. Por otro lado, durante el proceso se puede formar un concentrado por la acumulación de iones contaminantes que debe ser tratado. Por último, se deben garantizar los procesos de adecuación de las membranas para garantizar su buen funcionamiento.

A continuación, se muestran las características principales del sistema para el tratamiento de iones cloruro y la membrana estudiada para el tratamiento de iones sulfato.

**Tabla 8.**

*Características de sistema y membrana de osmosis inversa*

<b>Tipo de resina</b>	<b>Características</b>
BW30LE-440 [91]	<p>Alta productividad, puesta en marcha esencial para preparar las membranas y evitar daños debido a sobrealimentación o choque hidráulico.</p> <p>Evitar sobrepresión o cambios abruptos de flujo cruzado durante el arranque, apagado, limpieza u otras secuencias.</p> <p>Presión de alimentación: aumentarse gradualmente en un período de 30 a 60 segundos.</p> <p>Velocidad de flujo cruzado: debe alcanzarse durante 15-20 segundos.</p> <p>Permeado obtenido durante la primera hora debe desecharse</p> <p>Temperatura máxima de operación: 45°C</p> <p>Rango de pH para operación continua: 2-11</p> <p>Máximo caudal de alimentación: 85 gpm</p> <p>Máxima presión de operación: 41 bar</p> <p>Área activa: 7,6 m<sup>2</sup></p>
SEA PRO E-Series [92]	<p>Para facilitar su instalación y operación confiable, los componentes principales están montados sobre patines. Cuenta con una unidad de frecuencia variable que permite el control óptimo de la bomba de alta presión, eficiencia energética y producción constante. Cuenta con control manual simple y control manual/automático.</p>

	Rango de temperatura de operación: 15-32°C Presión mínima de entrada: 2 bar (30 psig) Tubería de alta presión: Sch 40 ss Duplex 2205 Tubería de baja presión: Sch 80 PVC DIN PN 10/16 Marco: acero al carbono tratado anticorrosivo Acabado del marco: recubrimientos pintados con epoxi de 2 capas Cajas: carbono IP55 acero Membranas: 440 pies cuadrados SWRO 99,5% Carcasa de membrana: filtros de cartucho de FRP 8in-1200psi-7M
--	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

**Nota.** La tabla muestra características relevantes de una membrana y un sistema de ósmosis inversa en los casos de estudio revisados.

A continuación, se muestran las características principales de las resinas empleadas para el tratamiento de iones cloruro por medio de electrodiálisis.

**Tabla 9.**

*Características de membranas para electrodiálisis*

Membranas	Características	Capacidad
JAM-II (intercambio aniónico) JCM-II (intercambio catiónico) [86]	Grosor: 0,16-0,23 mm <b>JAM-II</b> Contenido de agua: 24-30% Resistencia de área: 4-8 ohms cm <sup>2</sup> Eficiencia 90-95% <b>JCM-II</b> Contenido de agua: 33-38% Resistencia de área: 3-6 ohms cm <sup>2</sup> Eficiencia 95-99%	1,8 - 2,2 mmol/g 1,8-2 mmol/g

**Nota.** La tabla muestra características y capacidad de intercambio de resina empleadas para procesos de electrodiálisis.

Por último, el proceso de electrodiálisis presenta una gran eficiencia en cuanto a la remoción de iones cloruro. Los factores de mayor relevancia para este caso son la densidad de corriente máxima, ya que de esto depende el área de membrana necesaria para llevar a cabo el proceso. Además es posible que se requieran mas de una membrana de intercambio, por lo que se debe considerar este factor en caso de implementar esta alternativa.

Se pueden presentar limitaciones si la corriente de alimentación o diluido cuenta con una alta concentración del componente a remover, disminuyendo el porcentaje de remoción alcanzado, por lo que se requiere de un pre tratamiento para evitar afectaciones en el proceso. Además, se debe considerar el consumo energético requerido, ya que para mantener la temperatura de trabajo se requieren de intercambiadores de calor y se debe asegurar el flujo continuo de corriente. En cuanto a la estructura, se debe tener en cuenta las especificaciones de las celdas utilizadas, ya que pueden estar compuestas de diferentes elementos y las membranas, de acuerdo a los casos revisados, son distribuidas por fabricantes que no se encuentran dentro del territorio nacional.

Por medio de este tratamiento es posible recuperar de la corriente de alimentación componentes que cuentan con valor agregado, por lo que puede representar una alternativa de aprovechamiento siempre y cuando se cumplan con los requerimientos del proceso mencionados anteriormente.

### **3.3. Definición de los criterios considerados para seleccionar y evaluar las alternativas de tratamiento**

Al momento de llevar a cabo la selección de la mejor alternativa de tratamiento, es de gran importancia tener en cuenta los criterios relevantes dentro de los procesos de tratamiento de agua y que, a su vez estén relacionados con el cumplimiento de la normatividad exigida por entidades gubernamentales que rigen estos institutos termales.

Por esta razón, se plantean los siguientes criterios de evaluación:

**1. Impacto ambiental generado por el tratamiento:** Este parámetro está relacionado con el uso de solventes para el buen funcionamiento del proceso seleccionado, además, se tienen en cuenta emisiones o desechos generados por los equipos requeridos.

**2. Costos de implementación y mantenimiento:** Hace referencia a la inversión para la implementación del tratamiento y su mantenimiento conforme pasa el tiempo para garantizar su conservación. Costos del proyecto

**3. Nivel de pureza alcanzado al final del proceso:** Factor relacionado con el cumplimiento de la normatividad establecida en la resolución 0631 de 2015, la cual no exige una remoción total de iones cloruros y sulfatos.

**4. Espacio ocupado por los equipos del tratamiento:** Área disponible dentro del complejo turístico para la ubicación de los elementos necesarios en el tratamiento seleccionado.

**5. Grado de avance técnico del tratamiento:** Describe que tan sofisticada es la estructura, la complejidad del manejo operativo del tratamiento y el nivel de reconocimiento.

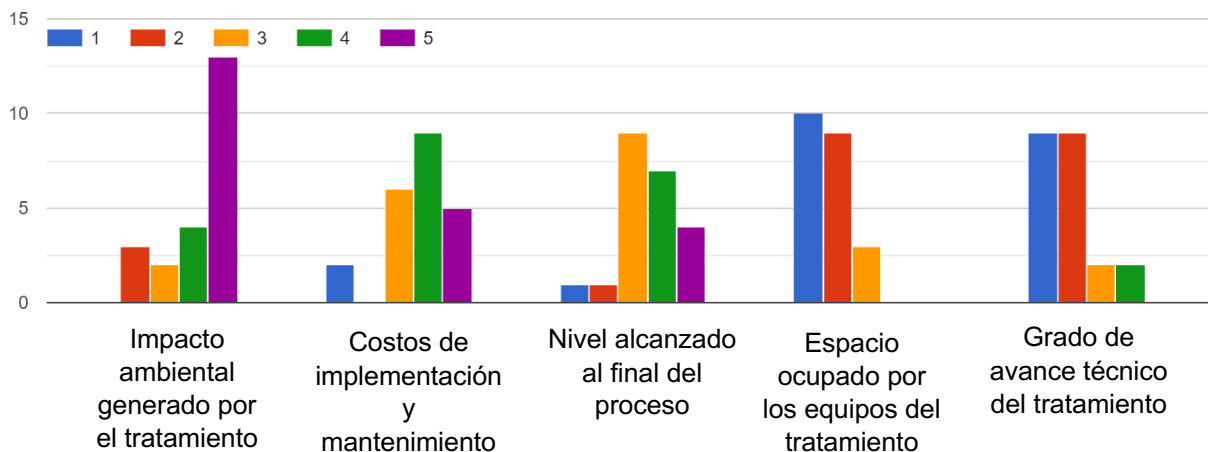
### **3.4. Elaboración de matrices de selección para una alternativa de tratamiento de aguas provenientes de piscinas termales de Paipa con vertimiento al río Chicamocha**

La importancia de cada uno de estos factores fue determinada con base en una encuesta realizada a profesionales en ingeniería y afines, investigación, academia y administrativos, cuyas experiencias laborales están relacionadas con el proyecto.

La encuesta fue realizada por 22 profesionales, la metodología de evaluación consistió en la elección de las variables por orden de prioridad de 1 a 5, siendo 5 el grado más alto de importancia y 1 el más bajo. Los resultados se pueden evidenciar en la Figura 26.

**Figura 30.**

*Resultados de la encuesta a profesionales y expertos acerca de la importancia de los criterios más relevantes de los tratamientos de aguas*



**Nota.** En imagen evidencia los resultados según el nivel de importancia asignados por profesionales con experiencia en tratamiento de aguas, donde el color azul (1) indica el nivel más bajo de importancia y el morado (5) indica el nivel más alto en la importancia como criterio para tener en cuenta en la implementación del tratamiento.

Esta encuesta se tuvo en cuenta el área de ocupación de los 22 profesionales, que están relacionados en su gran mayoría al área de ingeniería y afines como se muestra en el anexo L, lo que permite obtener resultados relacionados con el problema de investigación. En este caso, se llevó a cabo una encuesta con respuestas jerarquizadas, donde las preguntas son de orden de clasificación, para que el encuestado tenga una única oportunidad de clasificar los factores evaluados. Por último, el análisis de los resultados obtenidos se adelanta por medio de una tabla dinámica, que permite visualizar los datos en relación con la pregunta formulada.

Es importante tener en cuenta que se puede presentar un grado de incertidumbre en los resultados obtenidos en esta encuesta, ya que los encuestados pueden tener un conocimiento muy limitado acerca del proceso que se desea evaluar y como influye en el proceso cada factor especificado. Con el fin de disminuir el grado de incertidumbre de este instrumento de evaluación, se debe dirigir en su mayoría a profesionales que se

desempeñen en procesos de tratamiento de aguas, ya que cuentan con el conocimiento de los diferentes procesos que se pueden emplear, además de brindar nuevas opciones y observaciones al sistema propuesto.

En la siguiente tabla se muestra el nivel de importancia total de cada criterio, el cual fue determinado a partir del promedio de las respuestas por cada factor, en cuanto a la importancia por factor, se identificó por medio de un promedio que arrojaba un porcentaje dentro del nivel de importancia total de cada factor.

**Tabla 10.**

*Nivel de importancia de los criterios de evaluación*

Criterio	Importancia por factor					Nivel de importancia total	Porcentaje de importancia
	5	4	3	2	1		
Impacto ambiental	2,5	0,77	0,38	0,58	0	4,23	28,2%
Costos de implementación y mantenimiento	0,84	1,51	1	0	0,33	3,68	24,5%
Nivel de pureza alcanzado	0,65	1,13	1,45	0,16	0,16	3,55	23,7%
Espacio ocupado por los equipos	0	0	0,23	0,69	0,76	1,68	11,2%
Grado de avance técnico	0	0,17	0,17	0,76	0,76	1,86	12,4%

**Nota.** La tabla muestra el nivel de importancia de los criterios de evaluación con sus respectivos porcentajes, obtenidos por medio de una encuesta a profesionales.

Según la Tabla 10, la importancia de cada criterio esta jerarquizada de la siguiente manera: Impacto ambiental, Costos de implementación y mantenimiento, Nivel de pureza alcanzado, Grado de avance técnico y Espacio ocupado por los equipos. Con la determinación de la importancia de cada uno de los factores se procederá a la selección de la alternativa de tratamiento.

A continuación, se realizan unas matrices de decisión ponderada, las cuales asignan un puntaje de relevancia entre 1 y 3 a cada factor contemplado, teniendo en cuenta el porcentaje de importancia obtenido de la encuesta a expertos realizada en la sección anterior. La tabla 11 describe las características de los puntajes presentes en las matrices.

**Tabla 11.**

*Descripción de los niveles asignados a cada factor*

Criterio	Niveles		
	3	2	1
Impacto ambiental	Alta eficiencia energética y bajo uso de consumibles	Alta eficiencia energética y alto uso de consumibles	Bajo eficiencia energética y alto uso de consumibles
Costos de implementación y mantenimiento	Bajo	Medio	Alto
Nivel de pureza alcanzado	Altos niveles de pureza alcanzados	Valores cercanos a la concentración de la norma	Bajos niveles de pureza alcanzados
Espacio ocupado por los equipos	No hay necesidad de reforzamiento estructural y equipos compactos y modulares	Equipos modulares / sin necesidad de reforzamiento estructural	Necesidad de reforzamiento estructural / creación de áreas nuevas
Grado de avance técnico	Investigación con elevado número de patentes nivel industrial	Investigación banco - semi industrial (piloto)	Investigación en escala banco

**Nota.** La tabla muestra de descripción de cada nivel para los factores de evaluación propuestos en la matriz de selección.

Conforme al numeral “Análisis de la eficiencia de tratamientos de agua según casos de estudio teniendo en cuenta los criterios establecidos para la tecnología a proponer en vertimientos termales “, se realizaron las matrices a continuación, las cuales serán parte de la selección de los dos tratamientos a utilizar en la propuesta para la alternativa de tratamiento de aguas residuales.

La información bibliográfica recolectada, nos permitió identificar los parámetros más importantes en los tratamientos de la tabla 12. Esta tabla tuvo en cuenta los criterios de selección para el tratamiento, y además contemplo características fisicoquímicas de los efluentes presentados en los casos, lo cual hace más completa nuestra elección para el primer tratamiento del secuenciamiento a proponer, ya que el agua de esta investigación no es muy nombrada en la bibliografía.

**Tabla 12.**

*Matriz de decisión realizada para la selección del primer tratamiento de la propuesta de secuenciamiento*

Criterio	Tecnologías propuestas para el primer tratamiento			
	Carbón activado granular (CAG)	Biocarbón activado granular (BIO CAG)	Fique	Hidrotalcita
Impacto ambiental	3	2	2	2
Costos de implementación y mantenimiento	2	2	2	2
Nivel de pureza alcanzado	1	1	1	1
Espacio ocupado por los equipos	2	2	2	2
Grado de avance técnico	3	2	1	1
<b>Total</b>	2,17	1,76	1,64	1,64

**Nota.** La tabla muestra el nivel de cada factor para las cuatro propuestas de la primera fase del secuenciamiento.

Según los resultados de la tabla anterior, el tratamiento con carbón activado granular resulta la opción más viable para el proceso inicial en el tratamiento de aguas termales, todo esto soportado en la bibliografía analizada donde se confirmó la remoción de cloruros en un carbón activado granular. En esta se estudió a fondo el tipo de material adsorbente con todas sus propiedades y especificaciones, lo que logro corroborar el alto valor de remoción de iones cloruro, 84%. No obstante, a pesar de tener una



concentración de cloruros de 813,05 mg/L, bastante diferente a nuestra investigación, se evidencio que la remoción de cloruros es favorecida a concentraciones iniciales altas y medias, lo que quiere decir que es apta para la implementación de este trabajo.

Por otro lado, a pesar de que el tratamiento con Biocarbón activado representa la mejor alternativa para prevenir cualquier impacto ambiental, no cumple con los suficientes requerimientos para poder ser implementado como tratamiento de aguas termales. Este y el tratamiento con Fique sin alternativas que necesitan de más investigación a nivel piloto para un posterior escalamiento y así serian unas excelentes alternativas, que podrían llamarse sostenibles.

De acuerdo a la información recolectada sobre el funcionamiento de cada uno de los procesos de tratamiento terciario en los casos de estudio, a continuación, se determina el nivel de importancia de los factores de decisión establecidos anteriormente, con el fin de precisar cuál de las tres tecnologías de tratamiento terciario, representa la mejor opción para implementar como segundo tratamiento en el secuenciamiento a proponer.

**Tabla 13.**

*Matriz de decisión realizada para la selección del segundo tratamiento de la propuesta de secuenciamiento*

<b>Criterio</b>	<b>Tecnologías propuestas para el segundo tratamiento</b>		
	Intercambio Iónico	Osmosis Inversa	Electrodialisis
Impacto ambiental	3	2	2
Costos de implementación y mantenimiento	2	2	1
Nivel de pureza alcanzado	2	2	2
Espacio ocupado por los equipos	2	1	1
Grado de avance técnico	3	3	2
<b>Total</b>	2,12	2,01	1,64

**Nota.** La tabla muestra el nivel de cada factor para las tres propuestas de tratamiento terciario, como segunda fase en el secuenciamiento.

Considerando los resultados obtenidos en la tabla 13, el intercambio iónico (2,12) resulta ser la opción más viable para el tratamiento de iones cloruro presentes en la corriente de vertimiento de las piscinas termales. Teniendo en cuenta que la concentración actual es muy elevada, el secuenciamiento con esta tecnología permitiría acercarse al nivel límite establecido en la resolución 0631 de 2015.

### **3.5. Descripción del secuenciamiento para tratamiento de aguas termales partiendo de los resultados de las matrices de decisión**

De acuerdo a los resultados obtenidos en las matrices de selección, donde se evaluó la viabilidad de implementación del pre y tratamiento terciario de acuerdo a los factores establecidos, para el cumplimiento del objetivo principal de este trabajo, es necesario llevar a cabo un secuenciamiento que incluya un pre tratamiento con carbón activado granular y un proceso de intercambio iónico. Para este último, se debe tener en cuenta que es posible emplear 2 resinas de intercambio, de acuerdo a los casos presentados. Este factor puede implicar cambios en la estructura y funcionamiento del sistema, ya que se pueden requerir de nuevos equipos.

Por medio del pre tratamiento con carbón activado es posible reducir la concentración inicial de iones cloruro para que, al momento de que la corriente ingrese en la segunda fase, es decir, la de intercambio iónico, el porcentaje total de estos iones sea menor y se pueda alcanzar la concentración establecida por la resolución para los vertimientos de las piscinas termales.

#### **4. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUAS PROVENIENTES DE PISCINAS TERMALES PARA LA ALTERNATIVA SELECCIONADA**

Para poder determinar las condiciones de operación del secuenciamiento de tratamiento propuesto, es necesario tener en cuenta el volumen de agua que se descarga de las piscinas termales. Considerando que la piscina Panorámica es la de mayor volumen ( $376\text{m}^3$ ), se tomará este valor como referencia para el dimensionamiento.

Inicialmente se debe tener en cuenta que el proceso de desagüe se lleva a cabo por bombeo. Para este proceso se suelen utilizar bombas de vaciado, que son equipos diseñados para retirar gases o líquidos de sistemas o recipientes. El caudal de descarga depende de las características operativas del equipo, por ejemplo, para una bomba de vaciado CSP 750W se tiene un valor máximo de 12600 L/h. Para este tipo de equipos también se debe considerar la temperatura del fluido, ya que puede ser un limitante en la operación [93].

Para la determinación de las especificaciones técnicas que se necesitan para la implementación del tratamiento, se debe considerar cada fase del secuenciamiento, así como las variables de proceso, condiciones de operación, parámetros que influyen al material adsorbente, entre otros.

Es importante tener en cuenta que, la descripción del sistema de tratamiento se hace teniendo en cuenta factores específicos de la caracterización de la corriente descrita anteriormente. Uno de los factores más importantes es la precipitación, factor considerado en la campaña de muestreo realizada en el mes de marzo, uno de los meses que junto a abril y mayo cumplen con el mayor porcentaje de humedad y cantidad de días lluviosos del año. También la afluencia total de personas y capacidad de operación del instituto, que no supera el 30%, son factores que influyen en las especificaciones presentadas a continuación.

#### 4.1. Parámetros de proceso y condiciones de operación para la adsorción por carbón activado granular en una columna de lecho móvil

Al inicio del secuenciamiento, se plantea una columna de lecho móvil con carbón activado granular (CAG), considerando los casos de estudio identificados anteriormente y las propiedades de este material tales como, gran volumen de poro, extensa área superficial y presencia de grupos oxigenados, el CAG se establece como el material adsorbente para la primera fase del tratamiento de aguas termales.

Para hacer uso del carbón activado como adsorbente es primordial tener en cuenta el tipo de CA, de esto depende la eficacia en el proceso ya que algunos parámetros se ven afectados. Además, se destaca que la vida útil de este material es de aproximadamente un año, por lo que se debe tener en cuenta no exceder este tipo de operación, para no afectar los resultados del proceso. Los parámetros considerados para una buena selección de CAG para adsorción de cloruros son los siguientes:

**Tabla 14.**

*Parámetros para la selección de CAG para adsorción según la ASTM/ANSI/AWWA*

<b>PARÁMETRO</b>	<b>UNIDADES</b>	<b>RANGO</b>	<b>NORMA</b>
<b>Número de yodo</b>	mg/g de carbón	500-1200	ASTM D-4607
<b>Área superficial</b>	m <sup>2</sup> /g	500-1200	ASTM D-3037
<b>Radio medio de poro y volumen total de poro</b>	nm y cm <sup>3</sup>	0,7-500,0 y 0,2-1	ASTM C-699
<b>Densidad aparente</b>	g/cm <sup>3</sup>	0,26 -0,65	ASTM D-2854
<b>Dureza</b>	Adimensional	30-99	ASTM D-3802

<b>Rango de tamaño de partícula</b>	Malla estándar americana (U.S. Std Sieve)	4x8 - 20x50	ANSI/AWWA B604-90
<b>Tamaño efectivo de partícula</b>	Mm	0,4 - 3,3	ANSI/AWWA B604-90
<b>Contenido de cenizas totales</b>	% base seca	3 - 15	ASTM D-2866
<b>Solubles en agua</b>	% base seca	0,5-7	ASTM D-5029
<b>pH del extracto acuoso</b>	pH	2-11	ASTM D-3838
<b>Humedad (al empacar)</b>	%	2-15	ASTM D-2867

**Nota.** En la tabla se muestran los parámetros considerados por la ASTM/ANSI/AWWA para una correcta selección del carbón activado granular para el tratamiento de aguas. Tomado de American Society for Testing and Materials, BANSAL. R, DONNET J, STOECKLI. F. Activated carbon. Marcel Dekker, New York. (1998) y L. D. Arroyo Ramirez and D. M. Ruiz Rivera, “Determinación de la cinética de adsorción de cloruros de vertimientos del sector agrícola cultivos energéticos, sobre carbón activado comercial,” Fundación Universidad de América, 2018.

De la tabla anterior, se puede identificar que el área superficial es un factor dominante en el proceso, un alto valor en este criterio genera más sitios de unión lo cual genera una mejor adsorción del contaminante, no obstante, los demás parámetros para una buena selección de CAG también influyen en la adsorción del material. Estos parámetros que afectan de igual manera la adsorción del CA son: El porcentaje de cenizas, que representa una gran desventaja en el proceso de tratamiento de aguas residuales al aumentar el valor de este criterio, pues disminuye la cantidad de carbón efectivo. El índice de yodo afectando la adsorción desde la capa monomolecular, ocupando poros más pequeños en el CA lo cual sucede por la proporción de este al área de carbón [53].

Finalmente, la densidad aparente es el parámetro primordial para la actividad de un volumen de carbón y su mantenimiento.

Teniendo en cuenta que la adsorción de iones cloruro por carbón activado granular, es un proceso físico, donde las fuerzas de Van Der Waals son las encargadas de fijar el adsorbato en el adsorbente, es de gran importancia describir lo que ocurre en el interior de la columna y que parámetros influyen en este proceso. Los principales factores a tener en cuenta en el proceso de adsorción de cloruros por CAG son, temperatura, pH, tiempo de equilibrio y relación sólido/líquido. Siendo el tiempo de equilibrio y la relación sólido/líquido, los parámetros dominantes en cuanto a la capacidad de adsorción sobre el carbón activado y el pH, el más importante pues la adsorción de los iones cloruro es producida por la interacción de estos en solución con los grupos funcionales del CA dependiendo del pH de la solución lo cual condiciona el grado de disociación del adsorbato [53].

Conociendo los valores de temperatura y pH en el vertimiento de aguas termales de esta investigación, 38°C y 7,54 respectivamente, y considerando los estudios realizados en investigaciones anteriores, como el *“Efecto de la temperatura en el proceso de adsorción de agua en Carbón sub-bituminoso colombiano”* de Taborda, Jurado y Cortés y *“Determinación de la cinética de adsorción de cloruros de vertimientos del sector agrícola cultivos energéticos, sobre carbón activado comercial”* de Arroyo y Ruiz, se llegó a la conclusión que la temperatura adecuada del carbón activado para obtener resultados satisfactorios en el proceso de adsorción, es una temperatura entre 21 y 25 °C lo que implica un proceso de enfriamiento para el caudal del vertimiento, que se puede realizar en un depósito de almacenamiento anterior a la alimentación de la columna, el cual puede llevarse a cabo de manera abierta, considerando que la temperatura ambiente de Paipa se encuentra entre 7 y 20 °C, esto para evitar que no se vea afectado ni el material adsorbente ni el adsorbido y los cambios de temperatura no varíen en una escala mayor a 5 grados.

De igual manera, en cuanto al pH, teniendo en cuenta la bibliografía analizada, la naturaleza del carbón activado, la cual es ácida y el pH actual del vertimiento, el cual se encuentra en un rango de 6,38 y 7,54, lo cual es una evidencia del carácter neutro de

estas aguas residuales y la considera un agua con valores aceptables para asimilar nutrientes y descartar presencia de otros contaminantes que puedan acidificarla. Sin embargo, en la Figura 24, se identifica que a un valor de pH menor, se concentra una mayor cantidad de cloruros absorbidos, no obstante la variación es de 30mg/g lo cual no consideramos relevante, pues si se reduce el pH, acidificando el caudal del vertimiento, se tendría que usar ácido sulfúrico, lo cual según los criterios de selección del tratamiento no importa más que la prevención y cuidado del medio ambiente.

Además, en la Figura 24 es posible observar el efecto del pH sobre el tiempo de equilibrio. La determinación del tiempo de equilibrio se adelanta con respecto a los casos de estudio analizados anteriormente, teniendo en cuenta que son aguas con características similares al agua de estudio en este proyecto. Se estableció un tiempo de equilibrio de 16 horas considerando que el pH del vertimiento de aguas termales se encuentra en un promedio de 6,96 y observando la no variación de este parámetro en un tiempo mayor. Igualmente, el parámetro de relación sólido-líquido no es medible en este estudio, por lo tanto debemos basarnos en la relación establecida por la bibliografía estudiada en el numeral 3.2.1, donde la masa del carbón activado y el volumen de la muestra tratada se relacionan con un valor de 12,5 g/L, el cual es el valor propuesto como parámetro de proceso en este proyecto.

Finalmente, se decide escoger el mismo CAG del caso de estudio del numeral 3.2.1, teniendo en cuenta que esa investigación está basada en aguas con características similares a las aguas termales y entendiendo que uno de los parámetros de selección más importantes es el área superficial, la cual cumple a cabalidad el CAG-LQ 900S de Carbochem.

**Tabla 15.***Datos del CAG seleccionado*

<b>PARAMETROS</b>	<b>VALOR</b>
pH	7,1
% Humedad	32
Índice de Yodo	997
Densidad aparente (g/cc)	0,46
Área Superficial (m <sup>2</sup> /g)	542,44
% Cenizas	10

**Nota.** En la tabla se muestran los parámetros del CAG LQ 900S de Carbochem. Tomado de L. D. Arroyo Ramirez and D. M. Ruiz Rivera, “Determinación de la cinética de adsorción de cloruros de vertimientos del sector agrícola cultivos energéticos, sobre carbón activado comercial,” Fundación Universidad de América, 2018.

Como se mencionó anteriormente, se va a trabajar con carbón activado granular en un lecho móvil como método de contacto para evitar problemas de obstrucción de la superficie de este y realizar una regeneración continua del material adsorbente para evitar que la pérdida de carga no aumente con el tiempo.

Es importante tener en cuenta para un posterior diseño de equipos, la cantidad de adsorbato retenido en función de sus características, esto se conoce como isoterma de adsorción. Según la revisión bibliográfica realizada se encontró que la isoterma de Freundlich rige el proceso de adsorción de iones cloruro sobre carbón activado, gracias a esto se da el lugar a la formación de multicapas. En el caso de estudio seleccionado se establece un modelo de pseudo-segundo orden el cual, asume que el proceso de adsorción ocurre por formación de enlaces covalentes entre iones cloruros y los sitios activos del carbón activado [53]. Las isotermas de adsorción son clave en el análisis y diseño de procesos de adsorción, gracias a estas se logra la evaluación de la capacidad de adsorción la cual se puede calcular mediante la siguiente ecuación.



#### **Ecuación 4.**

*Capacidad de adsorción*

$$q_e = (C_o - C_e) * \frac{V}{m_s}$$

Donde  $C_o$  representa la concentración inicial del contaminante específico en la corriente de entrada y  $C_e$  la concentración de equilibrio (mg/L),  $V$  ( $m^3$ ) es el volumen de alimentación y  $m_s$  (Kg) es la cantidad de material adsorbente [87].

Posteriormente, es ideal evaluar las propiedades de sorción del CAG por medio de ensayos los cuales, puedas proporcionar la información suficiente para llevar a cabo el calculo de la cantidad retenida sobre el adsorbente ( $q$ ) y también analizar el equilibrio de adsorción, en este caso por medio de la ecuación de Freundlich [87].

#### **Ecuación 5.**

*Cantidad retenida sobre el adsorbente*

$$q = \frac{(C_o - C) * L}{m_s} = \frac{D * C_o}{\left(\frac{S}{L}\right)}$$

Donde  $(S/L)$  es la relación de masa de sólido a volumen de líquido utilizada,  $C_o$  la concentración inicial del contaminante específico en la corriente de entrada y  $D$  la fracción eliminada del contaminante [87].

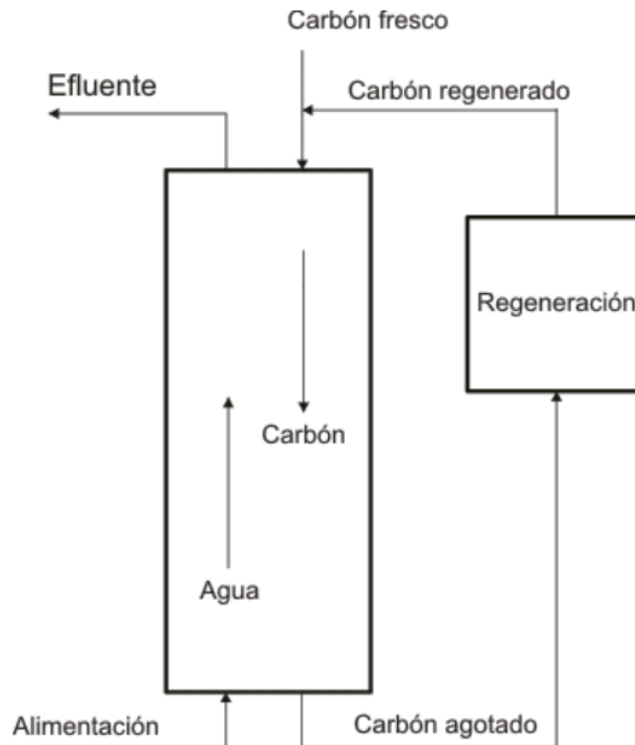
#### **Ecuación 6.**

*Ecuación de Freundlich*

$$q = K_F * C^{1/n}$$

**Figura 31.**

*Columna de lecho móvil con regeneración*



**Nota.** En la figura se evidencia una columna de lecho móvil expandido con flujo en contracorriente. Tomado de Textos Científicos, “Procesos en las plantas de tratamiento,” Jun. 25, 2006. [https://www.textoscientificos.com/quimica/carbon-activo/plantas-tratamiento.](https://www.textoscientificos.com/quimica/carbon-activo/plantas-tratamiento)

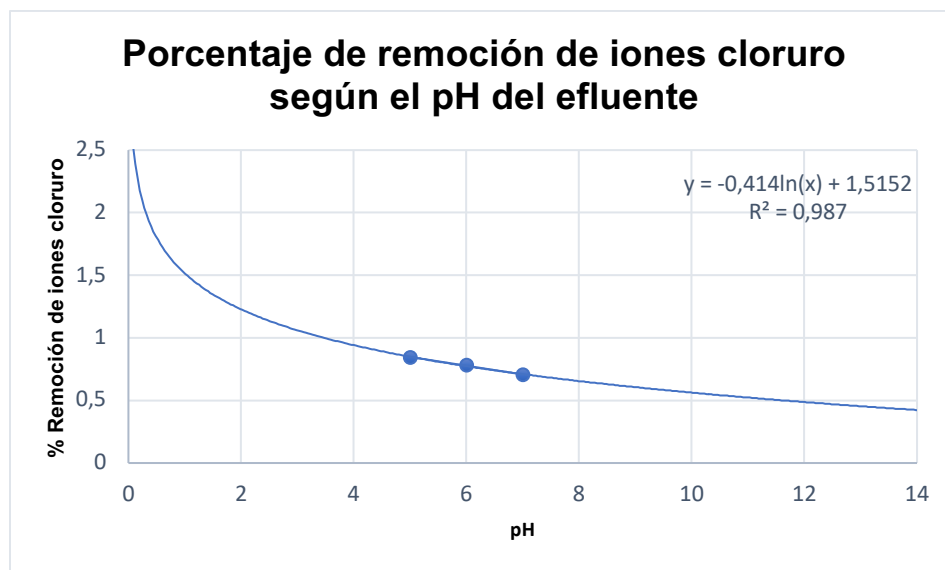
En la Figura anterior se puede observar una alternativa de columna con lecho móvil para una posterior implementación. Adicional a esto es importante tener en cuenta, proponer un depósito anterior a la alimentación con el fin de acondicionar el vertimiento, al final un tanque colector que transporte este contenido a la segunda fase del tratamiento y también una jeringa con aguja hipodérmica con el propósito de determinar el contenido de cloruros en el efluente [94].

#### 4.2. Estimación de la capacidad de adsorción y porcentaje de remoción del carbón activado como adsorbente

Teniendo presente que el rango de pH del vertimiento de aguas termales se encuentra entre 6,38 y 7,54, se realizó una interpolación para conocer un valor más cercano a la realidad considerando la experimentación con pH 7 del caso de estudio para adsorción con carbón activado presentado anteriormente. Todo esto teniendo en cuenta que las características de adsorción son intensivas, lo cual quiere decir que deben ser independientes de la cantidad de la sustancia que posea el efluente.

**Figura 32.**

*Grafica de tendencia del porcentaje de remoción de iones cloruro*

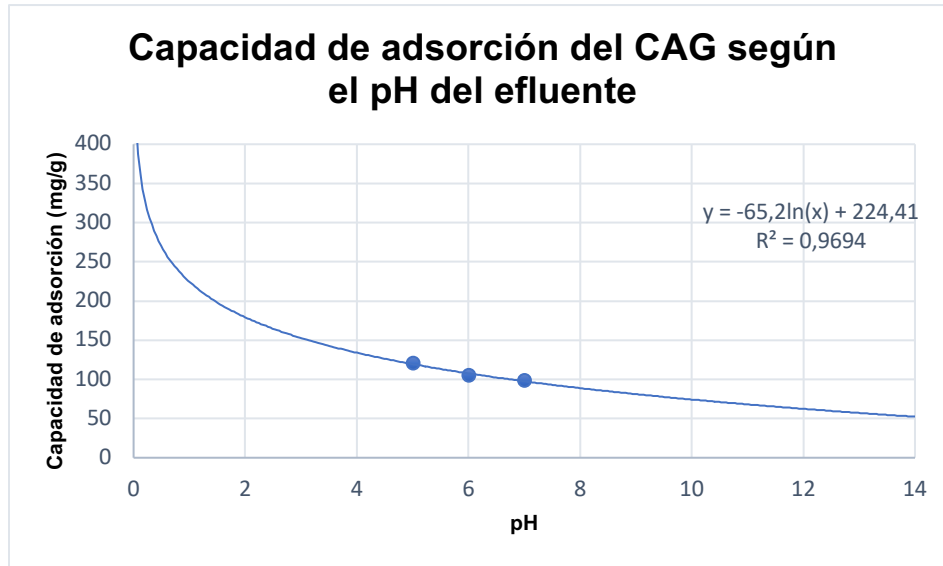


**Nota.** En la gráfica se evidencia la ecuación con la cual extrapolamos para obtener los resultados más cercanos de remoción de iones cloruros con carbón activado granular como adsorbente.

En cuanto al porcentaje de remoción de iones cloruro, este aumenta al disminuir el valor del pH, sin embargo, los valores de pH en el vertimiento de termales corresponden a 6,38 y 7,35 lo que alcanza un porcentaje de remoción de 74,79% y 67,88% respectivamente.

**Figura 33.**

*Grafica de tendencia de la capacidad de adsorción de iones cloruro*



**Nota.** En la gráfica se evidencia la ecuación con la cual extrapolamos para obtener los resultados más cercanos de capacidad de adsorción del carbón activado granular (CAG) como adsorbente.

La capacidad de adsorción nos dice que tan efectivo es el adsorbente, lo que en este caso corresponde a 103,58 y 92,69 mg/g, para el rango de pH manejado en el canal de vertimiento de las termales.

#### **4.3. Variables de proceso para el tratamiento de Intercambio Iónico**

En la segunda fase, correspondiente al intercambio iónico, se determinan las variables de proceso que se deben tener en cuenta para el sistema, descritos a continuación:

pH: Es una variable influyente en el proceso de intercambio iónico ya que la resina cuenta con un rango de pH óptimo de 0-7, establecido por el fabricante. Además, conforme los iones cloruro son intercambiados, el pH aumenta debido a la liberación de iones hidroxilo [95].

Temperatura: Las resinas de intercambio iónico tienen una temperatura de operación máxima con la que se garantiza el buen funcionamiento y cumplimiento del proceso, para

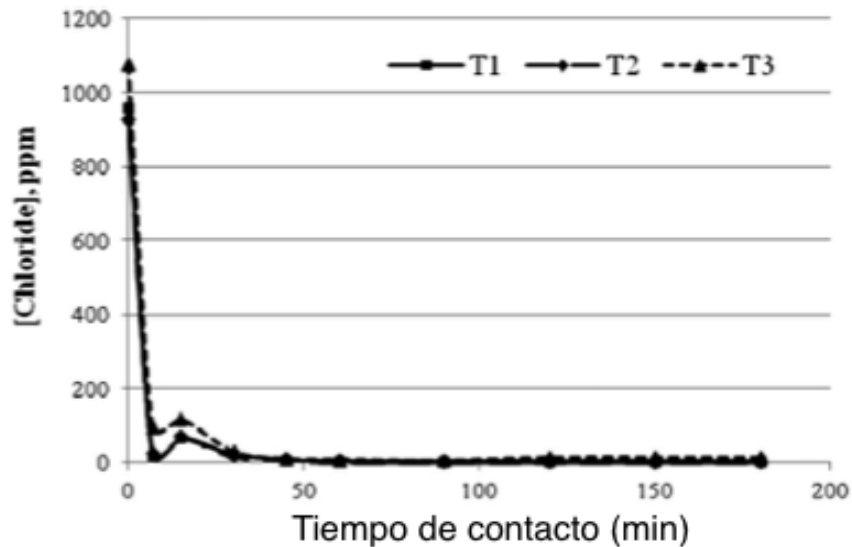
este tipo de resina se establece un límite de operación de 60°C, establecida por el fabricante. Si se excede este valor, se pueden presentar problemas durante el proceso de intercambio.

Caudal: Esta variable es fundamental para el dimensionamiento del sistema. Dependiendo del caudal de la corriente a tratar, se obtendrá la cantidad total de resina necesaria. Entre mayor sea este, el volumen requerido de la resina aumentará.

Tiempo de duración del ciclo: Esta variable es dependiente del caudal de la corriente, el tiempo establecido debe ser suficiente para llevar a cabo el tratamiento de la totalidad de dicha corriente y garantizar que se lleve a cabo el intercambio de iones entre la corriente y la resina. De acuerdo al caso de estudio descrito en el numeral 3.2.6, conforme aumenta el tiempo de contacto se evidencia la reducción considerable de la concentración de los iones cloruro, que no se ve afectado por los efectos de la temperatura [84].

**Figura 34.**

*Concentración de iones cloruro en la corriente de salida en función del tiempo de contacto*



**Nota.** En la figura se observa la concentración de iones cloruro adsorbidos por la resina de intercambio iónico en función del tiempo de contacto en minutos. Tomado de M. D. Víctor-Ortega, J. M. Ochando-Pulido, G. Hodaifa, and A. Martínez-Ferez, “Ion exchange as an efficient pretreatment system for reduction of membrane fouling in the purification of model OMW,” *Desalination*, vol. 343, pp. 198–207, 2014, doi: 10.1016/j.desal.2013.11.011.

Agente regenerante: De acuerdo a la naturaleza de la resina, se emplean diferentes sustancias regenerantes. Se debe tener en cuenta la concentración que debe tener la solución y el volumen necesario. Por la naturaleza de la resina, se emplea hidróxido de sodio como regenerante a una concentración del 4%.

Tiempo de regeneración: Una vez se cumple con el ciclo de operación, es necesario llevar a cabo el proceso de regeneración de las resinas. Se establece un tiempo mínimo en el que la solución regenerante debe estar en contacto con la resina para cumplir con

esta etapa del proceso. De acuerdo con las especificaciones del fabricante, el tiempo mínimo para este proceso debe ser de 30 minutos.

#### **4.4 Especificaciones de equipos y materias primas para el proceso de intercambio iónico**

##### **4.4.1 Equipos para la etapa de intercambio iónico**

4.4.1.i. Columna de acero inoxidable 316. Es el recipiente que es capaz de contener el volumen de resina especificado, además de que permite la distribución homogénea de la corriente a tratar por el lecho. El material de la columna es acero inoxidable 316 debido a su alta resistencia a la corrosión ante la sustancia regenerante utilizada en el proceso [96].

4.4.1.ii. Válvulas. Son necesarias para regular y controlar el caudal de agua que entra y sale del sistema. Estas son de cierre rápido (válvula de bola), de accionamiento manual y el material que las compone es PVC [96].

4.4.1.iii. Bombas. Para asegurar la velocidad de las corrientes que ingresan al proceso de tratamiento de intercambio iónico, se requiere de un sistema de bombeo que permita controlar y garantizar esta variable del proceso.

##### **4.4.2 Materias primas para la etapa de intercambio iónico**

4.4.2.i. Resina de intercambio iónico AMBERLITE IRA-67. Es una resina de intercambio aniónico de base débil, que cuenta con una matriz acrílica tipo gel. Tiene una alta capacidad, es de cinética rápida, resistente a las incrustaciones orgánicas y excelente estabilidad física. Su estructura acrílica flexible le permite la adsorción y desorción efectiva de moléculas orgánicas naturales presentes en suministros de agua [89]. Este tipo de resinas tienen una vida útil entre 5 a 10 años, de acuerdo a las especificaciones del fabricante, las resinas tienen una vida útil teórica de 70 a 300 m<sup>3</sup> de agua tratada por litro de resina [97].

4.4.2.ii. Hidróxido de sodio. Es una base fuerte que tiene la capacidad de disolverse fácilmente en el agua, generando gran cantidad de calor. Es soluble además en etanol y

metanol y es corrosivo para muchos metales. Las aplicaciones del hidróxido de sodio requieren soluciones diluidas, [98] como en este caso, se requiere una solución al 3% para actuar como agente regenerante de las resinas.

4.4.2.iii. Agua purificada. Para llevar a cabo la fluidización del lecho, es necesario hacer pasar por la resina una corriente de agua purificada. De acuerdo al caso de estudio revisado, corresponde a Milli Q, agua ultra pura.

#### **4.5 Dimensionamiento de la columna de intercambio iónico**

En la segunda fase, correspondiente al intercambio iónico, se determinan los parámetros de diseño del sistema descritos a continuación considerando que se emplea la resina de intercambio aniónico de base débil Amberlite IRA 67

##### **4.5.1 Tipo de sistema**

Es posible trabajar con un sistema batch o continuo, el diseño de esta columna se hará teniendo en cuenta que se trabaja con un lecho fijo con flujo continuo, los ciclos de operación terminan cuando se requiere llevar a cabo la regeneración de las resinas [96].

##### **4.5.2 Material de la columna**

Puede ser de polietileno reforzado, fibra de vidrio, acrílico, acero al carbón, o algún material que sea resistente a la acción corrosiva de la sustancia regenerante. Para este caso, considerando que el regenerante es NaOH se recomienda utilizar una columna de acero inoxidable 316 [96].

##### **4.5.3 Carga aniónica**

Este factor se establece teniendo en cuenta el valor de dureza total de la corriente a tratar. Este parámetro se toma de la primera etapa del proyecto, donde se registra un valor de 411 mg/CaCO<sub>3</sub> [44].

$$Ca = 411 \frac{\text{mg de CaCO}_3}{L} * \frac{1 \text{ meq CaCO}_3}{50 \text{ ppmde CaCO}_3}$$



Convirtiendo las unidades a meq/L se obtiene un valor de 8,22 meq CaCO<sub>3</sub>/L, que equivale a la carga iónica.

#### **4.5.4 Duración del ciclo**

Si se cuenta con un tanque de almacenamiento, el tiempo de duración debe ser igual al tiempo de llenado. Este valor depende del volumen a tratar y el caudal requerido para llenar el tanque,[96] y es posible determinarlo de la siguiente manera

##### **Ecuación 7.**

*Tiempo de duración de cada ciclo*

$$t = \frac{V_{H2O}}{Q_t}$$

Donde V<sub>H2O</sub> es la capacidad del tanque de almacenamiento y Q<sub>t</sub> es el caudal de la corriente que se emplea para llenar el tanque. Asumiendo que el tanque de almacenamiento tiene un volumen de 376 m<sup>3</sup> y el caudal es de 25484,4 L/h, el tiempo de duración es de aproximadamente 15 horas/ciclo.

#### **4.5.5 Oferta iónica**

Este valor se obtiene partiendo de la carga aniónica, caudal de servicio y el tiempo que dura un ciclo [44] como se muestra a continuación

##### **Ecuación 8.**

*Oferta iónica*

$$OI = CA * Q * t$$

Donde OI es la oferta iónica, CA es la carga aniónica, Q es el caudal y t el tiempo de cada ciclo [44]. Reemplazando los valores, se obtiene que la oferta iónica es de 3142,23 eq CaCO<sub>3</sub>/ciclo.

#### **4.5.6 Capacidad operativa de intercambio**

Hace referencia a los sitios activos donde tiene lugar el intercambio de iones, se expresa en eq/L y es un valor proporcionado por el fabricante en la ficha técnica del material. Para la resina aniónica de base débil corresponde a 1,60 eq/L [96].

#### **4.5.7 Volumen del lecho de resina**

Esta variable está relacionada con la tasa de flujo de la resina especificada por el proveedor y el caudal de operación,[44] y se calcula aplicando la siguiente formula

##### **Ecuación 9.**

*Volumen de resina*

$$V_R = \frac{Q}{SFR}$$

Así, se obtiene que el volumen de resina requerido es de 0,64 m<sup>3</sup>.

Con un factor de seguridad del 10% el volumen de la resina equivale a 0,704 m<sup>3</sup>.

#### **4.5.8 Dimensionamiento de la columna de intercambio**

Correspondiente al recipiente que retiene las resinas y por donde fluye la corriente a tratar, donde se considera la altura del lecho, altura de lecho expandido y el espacio libre por encima de la resina.

Tomando como referencia un valor de 0,8m como diámetro, [96] se tiene que el área de flujo por la columna de intercambio es de 0,502 m<sup>2</sup>, calculada utilizando la siguiente fórmula

##### **Ecuación 10.**

*Área de flujo*

$$A_f = \frac{\pi * D_c^2}{4}$$

Por otro lado, la altura de la resina dentro de la columna de intercambio se calcula mediante la siguiente ecuación [44]:

**Ecuación 11.**

*Altura de la resina*

$$H_R = \frac{V_R}{A_f}$$

Donde  $H_R$  es la altura de la resina,  $V_R$  es el volumen de la resina y  $A_f$  es el área de flujo dentro de la columna. Se obtiene un valor para la altura de la resina de 1,40 m. De acuerdo a las especificaciones del fabricante la expansión del lecho es 56 %, por lo que es necesario calcular la altura del lecho una vez se encuentra expandido con la siguiente ecuación [44].

**Ecuación 12.**

*Altura del lecho expandido*

$$H_e = H_R + (H_R * \%exp)$$

Obteniendo un valor de 2,18 m. Por otro lado, también es necesario conocer el volumen de resina que permanece inactiva, este valor es dado por el proveedor. En este caso, no se cuenta con un valor específico, por lo que se asume un valor de 3L, [44] de acuerdo al valor registrado para otra resina de la misma naturaleza. La altura de la resina inactiva se calcula de la siguiente manera

**Ecuación 13.**

*Altura de la resina inactiva*

$$H_i = \frac{V_i}{A_f}$$

Donde  $V_i$  corresponde al volumen de resina inactiva,  $A_f$  es el área de flujo dentro de la columna y  $H_i$  es la altura de la resina inactiva,[44] equivalente a  $5,97 \times 10^{-3}$  m.

Una vez se cuenta con estos valores es posible calcular la altura total de la columna de intercambio iónico por medio de la siguiente fórmula

**Ecuación 14.**

*Altura total de la columna  
de intercambio*

$$H_T = H_R + H_i + H_E$$

Donde  $H_R$  es la altura de la resina en la columna,  $H_i$  es la altura de la resina inactiva y  $H_e$  es la altura del lecho expandido [44]. Así, la altura de la columna equivale a 3,6 m.

**4.5.9 Acondicionamiento de las resinas**

Antes de iniciar la operación, la resina debe acondicionarse utilizando un flujo de agua purificada para crear la fluidización del lecho y la expansión de la resina a lo largo de la columna [96].

**4.5.10 Disposición**

En caso de utilizar mas de una resina, se debe especificar el orden de estas, para este caso, de acuerdo con las recomendaciones presentadas en el caso de estudio, se presenta una mayor efectividad trabajando primero con la resina catiónica y después con la resina aniónica [84]. Sin embargo, para este caso solo se utilizará una membrana de tipo aniónico.

**4.5.11 Velocidad de la corriente**

Con el fin de asegurar el rendimiento y efectividad del proceso, se debe garantizar que la velocidad de la corriente a tratar sea la indicada, para esto se calcula utilizando la siguiente fórmula

**Ecuación 15.**

*Velocidad de la corriente*

$$Vel = \frac{Q}{A_f}$$

Donde Q es el caudal de agua a tratar,  $A_f$  es el área de flujo y Vel es la velocidad de la corriente,[44] equivalente a 50,76 m/h.

#### 4.5.12 Retrolavado

Este proceso de adelanta con el fin de descompactar el lecho y eliminar impurezas retenidas a lo largo del ciclo. Para esto se utiliza una corriente ascendente de agua. De acuerdo a las especificaciones del fabricante, la velocidad de retrolavado es de 4 m/h dando una expansión del lecho aproximadamente de 65% a 15°C [89].

#### Ecuación 16.

*Caudal de retrolavado*

$$Q_d = v_d * A_f$$

#### 4.5.13 Regeneración

De acuerdo a las especificaciones dadas, para el proceso de regeneración para la resina aniónica, se emplea una solución acuosa de NaOH. Considerando las recomendaciones del fabricante, la solución debe estar al 4%.

Primeramente, es necesario conocer el valor de la capacidad operativa en granos por litro, por lo que se realiza la conversión correspondiente

$$C_{op} = 1,6 \frac{eq}{L} * \frac{1000 meq}{1 eq} * \frac{50 ppm de CaCO_3}{1 \frac{meqCaCO_3}{L}} * \frac{1 \frac{granos}{gal}}{17,1 ppm de CaCO_3} * \frac{1 gal}{3,78541 L}$$

Obteniendo así un valor para la capacidad operativa de 1235,89 granos/L. Con este valor es posible calcular la capacidad operativa instalada, determinada también por el volumen de la resina

#### Ecuación 17.

*Capacidad operativa instalada*

$$C_{opi} = C_{op} * V_R$$

Donde  $C_{opi}$  es la capacidad operativa instalada,  $V_R$  es el volumen de resina y  $C_{op}$  es la capacidad operativa [44] calculada anteriormente. Se obtiene un valor de 870066,56 granos.

Conociendo estos valores es posible calcular el volumen de agua requerida para el proceso de regeneración

**Ecuación 18.**

*Volumen de agua para la solución regenerante*

$$V_{agua} = \frac{C_{opi}}{Du}$$

Es necesario que el valor de la dureza se encuentre en unidades de granos/gal, por lo que se hace la respectiva conversión

$$Du = 411 \text{ ppm de } CaCO_3 * \frac{1 \frac{\text{granos}}{\text{gal}}}{17,1 \text{ ppm de } CaCO_3} * 1,6 = 38,456 \frac{\text{granos}}{\text{gal}}$$

Reemplazando este valor en la ecuación 11, el volumen de agua requerido por cada ciclo es de 22625 galones.

Es importante conocer el tiempo requerido entre los procesos de regeneración, es decir, el tiempo en el que la resina se encuentra inactiva

**Ecuación 19.**

*Tiempo entre regeneración*

$$t_{ereg} = \frac{V_{agua}}{Q}$$

Donde  $V_{agua}$  es el volumen de agua requerido y  $Q$  es el caudal de servicio en galones/día [44]. Se obtiene un valor de aproximadamente 4 horas.

De acuerdo a las especificaciones del proveedor, las condiciones óptimas de regeneración corresponden a una cantidad de NaOH de 2 BV (m<sup>3</sup> de regenerante/ m<sup>3</sup> de resina)

**Ecuación 20.**

*Cantidad de NaOH para la solución regenerante*

$$Nivel = \frac{masa\ de\ NaOH}{Volumen\ de\ resina}$$

Por lo tanto, es necesario emplear 1457,56 Kg de NaOH. Para esto se tiene en cuenta la densidad del NaOH al 2% a una temperatura de 40°C. Por otro lado, la masa de agua en solución, se determina teniendo en cuenta la concentración de NaOH que es del 4%

**Ecuación 21.**

*Cantidad de agua para la solución regenerante*

$$masa_{H_2O} = \left( \frac{masa\ de\ NaOH}{\frac{\% \text{ concentración NaOH}}{100\%}} \right) - masa\ de\ NaOH$$

Reemplazando los valores, se obtiene una cantidad total de 34981,44 Kg de agua. La densidad de esta sustancia es de 1 Kg/m<sup>3</sup>, por lo tanto, el volumen corresponde a 34981,44 m<sup>3</sup>. De acuerdo a los cálculos anteriores, para preparar una solución al 4% se requiere de 1457,56 Kg de NaOH en 34981,44 m<sup>3</sup> de agua. Para determinar el valor del volumen total de la solución de regeneración se tiene en cuenta la densidad de la solución a 40°C, equivalente a 1,0352 g/cm<sup>3</sup>, [99] obteniendo un valor de 35,2 m<sup>3</sup>.

Por último, para esta etapa, se determinan la velocidad y el caudal de la corriente de regeneración, así como el tiempo que se requiere.

### **Ecuación 22.**

*Caudal de regeneración*

$$Q_{reg} = RFR * V_R$$

Donde RFR es el flujo de regeneración especificado por el fabricante correspondiente a 10 BV/h,  $V_R$  es el volumen de resina y  $Q_{reg}$  el caudal de regeneración,[96] para el que se obtiene un valor de 7,04 m<sup>3</sup>/h. Para la velocidad se tiene en cuenta la siguiente fórmula

### **Ecuación 23.**

*Velocidad de regeneración*

$$V_{reg} = \frac{Q_{reg}}{A_f}$$

Donde  $Q_{reg}$  es el caudal de regeneración,  $A_f$  es el área de flujo en la columna y  $V_{reg}$  es la velocidad de regeneración,[44] con un valor de 14,02 m/h. Finalmente, se determina el tiempo necesario para la restauración de la resina

### **Ecuación 24.**

*Tiempo de regeneración*

$$t_{reg} = \frac{Vol_{reg}}{Q_{reg}}$$

Donde  $Vol_{reg}$  es el volumen de la solución,  $Q_{reg}$  es el caudal de regeneración y  $t_{reg}$  es el tiempo necesario para este proceso, equivalente a 2,5 horas.

El proceso de regeneración se lleva a cabo de forma ascendente, es decir, en contracorriente. Esto con el fin de permitir la recuperación de los sitios activos de la resina.



#### **4.5.14 Lavado**

Se adelanta con el fin de retirar el exceso de la solución regenerante de NaOH presenta en la resina y en la estructura de la columna de intercambio [44]. Este proceso se lleva a cabo a la misma velocidad de regeneración.

Para la determinación del porcentaje total de remoción en esta segunda etapa de tratamiento, es necesario llevar a cabo los respectivos análisis químicos, que permitan conocer el valor real de iones cloruro que permanecen en el agua una vez se termina con el proceso.

De acuerdo a las especificaciones determinadas para cada fase del secuenciamiento, se establecieron las siguientes condiciones

**Tabla 16.***Condiciones empleadas para el secuenciamiento de tratamiento de aguas termales*

Condiciones de proceso	FASE 1: ADSORCIÓN POR CARBÓN ACTIVADO GRANULAR
Temperatura del efluente	20 °C
Temperatura del carbón activado	21-25°C
pH del efluente	6,38-7,54
Tiempo de equilibrio	16 horas
Relación sólido líquido	12,5 g/L
	FASE 2: INTERCAMBIO IÓNICO
pH de operación	0-7
Temperatura máxima de operación	60°C
Caudal	25484,4 L/h
Tiempo de duración del ciclo	15 horas
Agente regenerante	Solución de NaOH al 4%
Tiempo de regeneración	2,5 horas

**Nota.** En la tabla se muestran las condiciones de proceso requeridas para el secuenciamiento propuesto.

En el anexo M se presenta el diagrama de flujo de proceso, donde se especifican las corrientes del sistema así como los equipos empleados para el tratamiento. La columna de adsorción por carbón activado granular se representa con la abreviación CA y las columnas de intercambio iónico con las abreviaciones C1, C2 y C3. Es importante tener en cuenta que la corriente de agente regenerante que entra al sistema y de solución regenerante que sale de el, se representa en la misma línea de trabajo que el agua de enjuague, sin embargo estas se manejan por líneas diferentes dentro del sistema. Por otro lado, al contar con tres unidades dentro de la etapa de intercambio iónico, las corrientes de entrada y salida de cada columna se nombran de forma individual.

Teniendo en cuenta las condiciones de proceso del secuenciamiento propuesto, se requiere de una experimentación completa, que permita determinar las dimensiones de cada unidad e identificar las cantidades de material en cada proceso. Sin embargo, los parámetros identificados anteriormente nos dan una dirección hacia donde se debe encaminar el tratamiento puesto que, se identificaron la influencia y afectaciones sobre los materiales y el proceso presentado, lo cual da un soporte para la implementación del secuenciamiento.

## 5. CONCLUSIONES

Se determinó el estado de los vertimientos generados por la actividad turística del ITP por medio de un análisis químico, con el que fue posible establecer que la concentración de iones cloruros excede el límite establecido en un 2305,6%, mientras que los iones sulfatos cumplen con el valor decretado en la resolución 0631 de 2015 alcanzando un valor de 8,9 mg SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/L.

Por medio de una revisión bibliográfica, se determinaron 4 alternativas para el tratamiento para una primera etapa y 3 alternativas para la segunda etapa del secuenciamiento, seleccionando la mejor opción por medio matrices Pugh, teniendo en cuenta el análisis de casos de estudio en los que se emplearon cada alternativa. Se obtiene que el carbón activado junto al intercambio iónico son el mejor sistema para su implementación, teniendo en cuenta factores ambientales, económicos y técnicos.

Se establecieron las especificaciones técnicas necesarias para cada etapa del proceso, teniendo en cuenta los factores de operación y las variables críticas que se deben considerar.

Para la primera fase del tratamiento, es decir, adsorción por carbón activado granular, se determinó un porcentaje de remoción de 74,79% y 67,88% respectivamente en el rango de pH del Canal de Vargas, todo esto partiendo del caso de estudio presentado para este tipo de material, donde se trabaja a condiciones que se asemejan a las establecidas para los vertimientos de aguas termales del instituto turístico de Paipa.

Por medio del dimensionamiento de la columna de intercambio iónico, segunda fase del tratamiento, se establecieron variables como volumen total de resina necesario, tiempo de duración de un ciclo, altura de la columna, tiempo de regeneración, entre otras. Estas variables se deben tener en cuenta para la implementación y funcionamiento del sistema.

Con la implementación del secuenciamiento propuesto no es posible alcanzar el límite establecido para la concentración de iones cloruros en los vertimientos del ITP de 250 mg Cl<sup>-</sup>/L, por lo que es de gran importancia buscar otras alternativas que permitan el cumplimiento de este parámetro.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] N.D, “Introducción al Termalismo 1.”
- [2] J. Ignacio and P. Espejel, “Infraestructura hidrotermal,” 1993. doi: <https://doi.org/10.23853/bsehm.1993.0800>.
- [3] J. Reynerio, F. Castillo, and P. González Hernández, “Aguas naturales, minerales y mineromedicinales Autores.”
- [4] L. Antonio Silva Rubio -Coordinador Andrea and B. Huertas, “Presentación 7 contenido Superintendencia de industria y comercio Grupo Banco de Patentes.” Accessed: Apr. 21, 2021. [Online]. Available: [www.commons.wikimedia.org](http://www.commons.wikimedia.org).
- [5] E. Rodie, “Tratamiento de aguas residuales capitulo IV,” México D.F., 2013.
- [6] L. Andrade, E. F. Covelo, and F. A. Vega, “Uso de Arcillas Especiales para la Depuración de Aguas Residuales,” *Inf. Tecnol.*, vol. 16, no. 1, pp. 3–10, 2005, doi: 10.4067/s0718-07642005000100002.
- [7] “Opciones de tratamiento de aguas residuales mediante carbón activo.” Accessed: Apr. 21, 2021. [Online]. Available: [www.gedar.com](http://www.gedar.com).
- [8] Belzona Inc., “Tratamiento de Aguas Residuales mapa de la Plata,” Miami, USA, 2010. Accessed: Apr. 22, 2021. [Online]. Available: [https://www.belzona.com/es/solution\\_maps/wastewater/money\\_map.pdf](https://www.belzona.com/es/solution_maps/wastewater/money_map.pdf).
- [9] K. A. Ayala Gil, “Evaluación de procesos para la remoción de iones cloruro en el agua residual de la planta de alimentos pepsico (Funza).,” Fundación Universidad de América, 2016.
- [10] M. O. Navarro, “Demanda bioquímica de oxígeno 5 días, incubación y electrometría.,” *Inst. Hidrol. Meteorol. y Estud. Ambient.*, vol. 2, pp. 2–9, 2015, [Online]. Available: <http://www.ideam.gov.co/>.
- [11] IDEAM, “Demanda Química De Oxígeno Por Reflujo Cerrado Y Volumetrica,”

- Minist. Ambient. Vivienda y Desarro. Territ.*, p. 11, 2007, [Online]. Available: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Demanda+Química+de+Oxígeno.pdf/20030922-4f81-4e8f-841c-c124b9ab5adb>.
- [12] M. I. Toapanta Vera, “Calidad del Agua: Grasas y Aceites.” Accessed: Apr. 21, 2021. [Online]. Available: <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/6161/8/GRASASYACEITES.pdf>.
- [13] “Volumetría de precipitación.” Accessed: Apr. 21, 2021. [Online]. Available: <http://ing.unne.edu.ar/pub/quimica/ab2/TP4.pdf>.
- [14] J. D. Bolaños-Alfaro, G. Cordero-Castro, and 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 (Costa Rica),” *Rev. Tecnol. en Marcha*, vol. 30, no. 4, p. 15, 2017, doi: 10.18845/tm.v30i4.3408.
- [15] Y. Solís-Castro, L. Alberto Zúñiga-Zúñiga, D. Mora-Alvarado, and D. La, “La conductividad como parámetro predictivo de la dureza del agua en pozos y nacientes de Costa Rica Conductivity as a predictive parameter of hardness in groundwater and spring water of Costa Rica,” *Tecnol. en Marcha*, vol. 31, no. 1, pp. 35–46, 2018, doi: 10.18845/tm.v31i1.3495.
- [16] O. Institucional, “Contaminación de la Cuenca Alta del Río Chicamocha y algunas aproximaciones sobre la salud humana,” *Rev. Salud, Hist. Y Sanid. On-Line*, vol. 2, no. 1, 2009, doi: 10.19053/19092407.1801.
- [17] A. Medina *et al.*, “La cuenca media y alta del río chicamocha Versión Preliminar,” 2016.
- [18] Lifeder, “Río Chicamocha: características, recorrido, ciudades, flora, fauna.” <https://www.lifeder.com/rio-chicamocha/> (accessed Mar. 29, 2021).
- [19] “Hidrografía Boyacense - Gobernación de Boyacá.”

- <https://www.boyaca.gov.co/hidrografia-boyacense/> (accessed Mar. 29, 2021).
- [20] C. Alfaro, “La enigmática fuente de calor de los termales de Paipa (Boyacá),” p. 12, 2004.
- [21] S. Baena, G. López Ramirez, and C. Diaz Cardenas, “Estudio de la Diversidad de Microorganismos de Ambientes Termales y Salinos de la Región Andina Central de Colombia,” 2019. Accessed: Mar. 29, 2021. [Online]. Available: [https://ipt.biodiversidad.co/sib/resource?r=carg\\_sandrab\\_puj](https://ipt.biodiversidad.co/sib/resource?r=carg_sandrab_puj).
- [22] Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Universidad Nacional de Colombia, and Corporación Autónoma de Boyacá, “Capitulo 1: Análisis Territorial,” *Plan Ord. Y Manejo Ambient. la cuenca alta del Río Chicamocha*, p. 608, 2012, [Online]. Available: <https://www.corpoboyaca.gov.co/cms/wp-content/uploads/2015/11/diagnostico-capitulo1-pomca-chicamocha.pdf>
- [23] S. de A. Gobernación de Boyaca, “Plan departamental de extensión agropecuaria Director Dirección de Desarrollo Rural,” pp. 1–83, 2020.
- [24] “La hora del turismo para Colombia.” <https://www.larepublica.co/analisis/flavia-santoro-2807402/la-hora-del-turismo-para-colombia-2822338> (accessed Mar. 29, 2021).
- [25] “Los sitios turísticos colombianos certificados como ‘destinos sostenibles.’” <https://www.semana.com/pais/articulo/destinos-turisticos-sostenibles-certificados-en-colombia/245571/> (accessed Mar. 30, 2021).
- [26] Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, “Índice de calidad del agua en corrientes superficiales ( ICA ),” no. 96, pp. 1–11, 2013, [Online]. Available: [http://www.ideam.gov.co/documents/24155/125494/36-3.21\\_HM\\_Indice\\_calidad\\_agua\\_3\\_FI.pdf/9d28de9c-8b53-470e-82ab-daca2d0b0031](http://www.ideam.gov.co/documents/24155/125494/36-3.21_HM_Indice_calidad_agua_3_FI.pdf/9d28de9c-8b53-470e-82ab-daca2d0b0031).
- [27] C. Organol and O. Fisiol, “TEMA : ANÁLISIS DE AGUAS,” pp. 1–47.

- [28] “Drainage water quality Chapter 2,” 1997.  
<http://www.fao.org/3/w7224e/w7224e06.htm> (accessed Mar. 30, 2021).
- [29] Australian Government Department of the Environment and Energy, “Sulfate in Surface Water — Rehabilitation Standard for the Ranger uranium mine,” no. September, pp. 1–9, 2018.
- [30] R. D. C. M. De Agricultura, “Decreto 1541 de 1978,” vol. 88, no. Julio 26, pp. 309-352, 1978, [Online]. Available:  
[https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Decreto\\_1541\\_de\\_1978.pdf](https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Decreto_1541_de_1978.pdf).
- [31] Ministerio de Agricultura, “Decreto 1594 de 1984,” Jun. 26, 1984.  
[https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Decreto\\_1594\\_de\\_1984.pdf](https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Decreto_1594_de_1984.pdf) (accessed Apr. 20, 2021).
- [32] Vivienda y desarrollo territorial Ministerio de ambiente, “Decreto 3100 de 2003,” 2003.
- [33] Ministerios de la Protección Social, “Decreto número 1575 de 2007 ,” May 09, 2007.  
<https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/Disponibilidad-del-recurso-hidrico/Decreto-1575-de-2007.pdf> (accessed Apr. 20, 2021).
- [34] Sistema Único de Información Normativa SUIN, “Decreto 1324 de 2007.”  
<http://suin.gov.co/viewDocument.asp?id=1908902> (accessed Apr. 20, 2021).
- [35] V. y D. T. Ministerios de Ambiente, “Decreto Número 1323,” Apr. 19, 2007.  
[https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/decretos/2007/dec\\_1323\\_2007.pdf](https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/decretos/2007/dec_1323_2007.pdf) (accessed Apr. 20, 2021).
- [36] M. de ambiente vivienda y desarrollo territorial, “Decreto 3930 del 2010,” *Minist. Ambient. vivienda y Desarro. Territ.*, p. 29, 2010, [Online]. Available:  
<http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/bf->



Resolución%0A610%0Ade%0A2010%0A-%0ACalidad%0Ade%0AAire.pdf.

- [37] M. E. García, J. A. Pérez, and L. Generalidades, "Aguas Residuales. Composición."
- [38] C. M. para la gestión del R. de Desastres, "Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres," 2013.
- [39] Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM, "Características Climatológicas De Ciudades Principales Y Municipios Turísticos," *Inst. Hidrol. Meteorol. y Estud. Ambient.*, p. 48, 2018, [Online]. Available: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418894/Características+de+Ciudades+Principales+y+Municipios+Turísticos.pdf/c3ca90c8-1072-434a-a235-91baee8c73fc%0Ahttp://www.ideam.gov.co/documents/21021/21789/1Sitios+turisticos2.pdf/cd4106e9-d608-4c29-91cc-16bee91>.
- [40] "El programa nacional de caracterización del agua lluvia - Ideam." <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/el-programa-nacional-de-caracterizacion-del-agua-lluvia> (accessed Mar. 30, 2021).
- [41] C. Ballesteros-camaro and A. Cerpa, "Caracterización geoquímica de fuentes termales asociadas al volcán Cerro Machín , NW de Colombia : Definición preliminar de un modelo genético," no. August, 2019.
- [42] J. L. Benítez, M. B. Mostue, and M. López, "Estudio Físicoquímico E Isotópico De Aguas Termales Del," *Univ. Oriente, Venez.*, vol. 27, no. Universidad de Oriente, Núcleo de Sucre, Escuela de Ciencias, Departamento de Química, Cumaná, Venezuela, pp. 94–101, 2015.
- [43] Y. Hao *et al.*, "Chemical and isotopic constraints on the origin of saline waters from a hot spring in the eastern coastal area of China," *Hydrogeol. J.*, vol. 28, no. 7, pp. 2457–2475, 2020, doi: 10.1007/s10040-020-02199-7.
- [44] M. A. Cely Vargas and P. V. Acevedo Buitrago, "Propuesta para la disminución de contaminantes en las aguas residuales provenientes de las piscinas termales

- del instituto de turismo de paipa.,” Fundación Universidad de América, 2020.
- [45] C. Alfaro, “Geoquímica de fuentes minerales y termales del complejo volcánico cerro bravo - cerro machín, colombia,” no. 41.
- [46] *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*, 1st ed., vol. 1. Editorial Díaz de Santos, 1992.
- [47] I. Aguilera Rodríguez, R. M. Pérez Silva, and A. Marañón Reyes, “Determinación de sulfato por el método turbidimétrico en aguas y aguas residuales. validación del método,” *Rev. Cuba. Química*, vol. 3, pp. 39–44, 2010, Accessed: Apr. 30, 2021. [Online]. Available: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=443543720007>.
- [48] M. del C. De la rosa and M. Á. Romero, *Diversidad microbiana de las aguas minerales termales*. Madrid, 2000.
- [49] S. V. Nuñez Almeida, “Estudio microbiológico de las aguas termomineromedicinales del balneario ‘el salado’ de baños de agua santatungurahua,” Riobamba-Ecuador, 2015.
- [50] ITP, “Reporte de ITP por ingresos, mantenimiento y red hidráulica,” 2021.
- [51] HidroPlayas EP, “Trampa de grasas,” Guayaquil.
- [52] Universidad de Sevilla, “Manual del carbón activo.”
- [53] L. D. Arroyo Ramirez and D. M. Ruiz Rivera, “Determinación de la cinética de adsorción de cloruros de vertimientos del sector agrícola cultivos energéticos, sobre carbón activado comercial,” Fundación Universidad de América, 2018.
- [54] Z. Sun, L. Chai, Y. Shu, Q. Li, M. Liu, and D. Qiu, “Chemical bond between chloride ions and surface carboxyl groups on activated carbon,” *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, pp. 53–59, 2017, doi: 10.1016/j.colsurfa.2017.06.077.
- [55] M. Requena Molina, “Diseño de un sistema combinado de carbón activo y reactor biológico secuencial para eliminación de compuestos farmacéuticos presentes en

- aguas residuales urbanas ,” Universidad politecnica de valencia, Valencia, 2018.
- [56] R. A. Balta Crisologo, “El carbón activado y el biocarbón en la asimilación del cadmio por el tomate (*solanum lycopersicum* L.) bajo el invernadero,” Universidad Nacional Agraria, Lima, 2019.
- [57] J. S. Cha *et al.*, “Production and utilization of biochar: A review,” *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 40. Korean Society of Industrial Engineering Chemistry, pp. 1–15, Aug. 2016, doi: 10.1016/j.jiec.2016.06.002.
- [58] N. A. Rashidi and S. Yusup, “A review on recent technological advancement in the activated carbon production from oil palm wastes,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 314. Elsevier B.V., pp. 277–290, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.cej.2016.11.059.
- [59] H. M. Ticlla Quispe, “Control de *Plasmodiophora brassicae* en brócoli (*Brassica oleracea* var. *Italica*) cv. ‘Avenger’ con *Trichoderma viride* mezclado con biocarbón activado,” Universidad Nacional De San Agustín, Arequipa.
- [60] M. Hernández, A. Otero, J. Falcón, and Y. Yperman, “Características fisicoquímicas del carbón activado de conchas de coco modificado con HNO<sub>3</sub> ,” 2017.
- [61] N. Agudelo and J. Husserrl, “Evaluación de la remoción de sales por medio del uso de fibras de *Furcraea bedinghausii* (fique) y fibras de fique modificadas químicamente.”
- [62] C. Jiménez, “Evaluación de fibra *Furcraea Bedinghausii* como material adsorbente de cationes Na<sup>+</sup> a partir de solución de NaCl.”
- [63] M. C. Colmenares and E. Mare, “Removal of chloride ions from de wastewater using hydrotalcites as adsorbent materials,” Universidad de Carabobo, Carabobo, 2017.
- [64] R. Cuevas, M. T. Bueno, J. Ramírez, C. Salcedo, B. Mar, and F. Pedraza,

- “Hidrotalcitas como precursores de óxidos mg-al sobre arcilla usados en la reducción de emisiones SO<sub>x</sub>,” Distrito federal, México, 2003.
- [65] M. de los A. Mantilla Ramirez, “Obtención de óxidos mixtos a partir de materiales tipo hidrotalcita: aplicación a diferentes procesos industriales y ambientales,” Instituto politecnico nacional, 2010.
- [66] J. J. Brenes Varo, “Diseño de procesos de tratamiento terciario de ozonización del agua de salida de una EDAR convencional para su reutilización en el riego de campos de golf,” vol. 1, p. 314, 2006.
- [67] C. Sánchez Ruiz, “Ion exchange series: tertiary treatments ion exchange (FS-TER-006),” no. September, 2015.
- [68] A. M. Wachinski, *Fundamental Principles and Concepts of Ion Exchange*. 2016.
- [69] C. Sanchez, “Intercambio iónico,” 2015.
- [70] B. Reyna Avila, “El intercambio iónico, su descripción y comportamiento químico,” Instituto Politecnico Nacional, Mexico D.F, 2014.
- [71] “Ion Exchange Resins Fundamentals of Ion Exchange Tech Fact,” Nov. 2019.
- [72] S. R. Pinargote Chavarria, “Obtención y análisis de agua desionizada,” Guayaquil, Aug. 2015.
- [73] VERLEK Ingenieria SAS-Colombia, “Resinas cationicas y anionicas,” Feb. 2019. .
- [74] J. A. Moreno Benavides, “Diseño de planta de tratamiento de agua de osmosis inversa para la empresa dober osmotech de colombia ltda,” Universidad Autonoma de Occidente, Santiago de Cali, 2011.
- [75] “The process of reverse osmosis,” in *Efficient Desalination by reverse osmosis*, London: IWA Publishing, 2016.
- [76] PURETEC, “Basics of Reverse Osmosis.”

- [77] N. F. Vicencio Ovalle, "Síntesis y caracterización de membranas para osmosis inversa con capacidad anti-bioincrustante, por incorporación de nano partículas de dióxido de titanio ," Universidad de Chile , Santiago de Chile, 2015.
- [78] P. Ures Rodríguez, A. Jácome Burgos, and J. Suárez López, "Filtración en membrana y ósmosis inversa," 2015.
- [79] I. F. Medina Roa, "Tratamiento de aguas de producción con electrodiálisis," Universidad de los Andes, Mérida, 2007.
- [80] R. Jarava Galván and I. P. Planeta Barros, "Análisis de Alternativas para la Remoción de Cloruros presentes en las Aguas Residuales Industriales de Producción del Campo Cicuco Ecopetrol S.A.," Universidad Nacional Abierta y a Distancia , Valledupar, 2017.
- [81] J. A. Venero Muñiz, "Procesos de separación por electrodiálisis," Universidad Nacional de Ingeniería , Lima, 2002.
- [82] A. J. Burgos, J. Suárez López, and P. Ures Rodríguez, "Adsorción en carbón activo (FT-TER-002)," 2014.
- [83] F. A. Basualto Pedreros, "Extracción de sulfato mediante resinas de intercambio iónico para su aplicación al tratamiento de aguas de relaves," Mar. 2019.
- [84] M. D. Víctor-Ortega, J. M. Ochando-Pulido, G. Hodaifa, and A. Martínez-Ferez, "Ion exchange as an efficient pretreatment system for reduction of membrane fouling in the purification of model OMW," *Desalination*, vol. 343, pp. 198–207, 2014, doi: 10.1016/j.desal.2013.11.011.
- [85] P. Kinnunen, H. Kyllönen, T. Kaartinen, J. Mäkinen, J. Heikkinen, and V. Miettinen, "Sulphate removal from mine water with chemical, biological and membrane technologies," *Water Sci. Technol.*, vol. 2017, no. 1, pp. 194–205, Apr. 2018, doi: 10.2166/wst.2018.102.
- [86] L. Cui *et al.*, "Electrolysis-electrodialysis process for removing chloride ion in wet

- flue gas desulfurization wastewater (DW): Influencing factors and energy consumption analysis,” *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 123, pp. 240–247, 2017, doi: 10.1016/j.cherd.2017.05.016.
- [87] M. Díaz, *Ecuaciones y cálculos para el tratamiento de aguas*, Ediciones. Madrid, 2018.
- [88] Rohm and Haas Company, “AMBERLITE™ IRA402 CI Industrial Grade Strong Base Anion Exchanger,” 2008.
- [89] Rohm and Haas Company, “AMBERLITE™ IRA67 Industrial Grade Weak Base Anion Exchanger.”
- [90] “A Uniform Particle Size, High Capacity Cation Exchange Resin for Softening (Industrial and Residential) and Demineralization Applications.”
- [91] Dow Chemical Company, “FILMTEC™ Membranes BW30LE-440.” .
- [92] G. E. Company, “SeaPRO E-Series Seawater Destilation Machine,” 2010.  
[https://www.watersurplus.com/techfiles/GE Water Systems/seaPRO-E 210.pdf](https://www.watersurplus.com/techfiles/GE%20Water%20Systems/seaPRO-E%20210.pdf).
- [93] C. Piscinas, “BOMBA DE VACIADO CSP 750W.” <https://www.cash-piscinas.com/bomba-de-vaciado-csp-750w-p-5717>.
- [94] V. Ríos and C. Ortega, “Prediction of breakthrough curves for the removal of lead (II) in aqueous solution onto activated carbon in a packed column,” Marzo, 2013.
- [95] A. M. D. Víctor-ortega and J. M. Ochando-pulido, “Efecto del pH en la adsorción de cloruro en Amberlite IRA-67 para la depuración de agua residual pretratada procedente de almazaras Resumen Los estudios de adsorción se llevaron a cabo en modo semicontinuo a temperatura,” vol. 1, pp. 2–5, 2002.
- [96] C. Salvador, “Diseño de un sistema de intercambio catiónico de lecho fijo para la potabilización de agua en el corregimiento de Malagana (Bolívar),” 2014.
- [97] Kasalab, "Regeneración de resinas de intercambio iónico". 2018. [Online].

Available: <https://www.kasalab.com/como-hacer-la-regeneracion-de-resinas-de-intercambio-ionico-en-un-desionizador-de-agua/>

[98] Ideam, "Hidróxido de sodio," Guía 17. pp. 263–276.

[99] R. Perry, *Manual del Ingeniero Químico*. 1999.

[100] Manual Estructuración del Trabajo de Grado. Fundación Universidad de América, 2021. [PDF].

# **ANEXOS**



## **ANEXO 1.**

### **RECOMENDACIONES**

Se debe llevar un control permanente de las condiciones de operación especificadas, con el fin de garantizar que no se presenten afectaciones tanto al carbón activado granular como a la resina aniónica.

Proponer un sistema de tratamiento que permita la recuperación de las sales presentes en la corriente de vertimiento (economía circular), para su posterior venta, generando un beneficio económico para el instituto.

Se recomienda llevar a cabo un estudio del uso de Biocarbón como material adsorbente, considerando que Boyacá es un departamento agrícola. Este tipo de actividades generan desechos que pueden ser utilizados para este tipo de aplicaciones.

Se aconseja llevar a cabo la experimentación completa del secuenciamiento propuesto, con el fin de justificar y corroborar el porcentaje de remoción de iones cloruros total.

Para facilitar el control del tratamiento y la calidad del agua, se recomienda automatizar el proceso descrito, considerando los resultados obtenidos de la experimentación.

Se propone implementar un tipo de pre tratamiento, el cual pueda disminuir la concentración de iones cloruro y así alcanzar el porcentaje exigido por la normatividad, es decir 250 mg Cl<sup>-</sup>/L.

## ANEXO 2.

### RESULTADOS DE ANÁLISIS DE AGUAS 18/03/21 HORA:2 PM



Código: F-69-02  
Versión: 3  
Fecha: 15/12/2020

#### RESULTADOS DE ANÁLISIS AGUAS

INFORME DE RESULTADOS Nº: 605-40			
CLIENTE: MARIANA FORERO MOSQUERA	CANTIDAD: 400	RESPONSABLE MUESTREO: CLIENTE	
NIT: 1015476068-9	FECHA DE MUESTREO: 19/03/2021	T (° C) MUESTREO: N.E.	
TELÉFONO: 3176678628	FECHA DE RECIBIDO: 24/03/2021	DESCRIPCIÓN: ARnD	
CONTACTO: Mariana Forero Mosquera	TIPO DE EMPAQUE: PET	TIPO DE MUESTREO: Puntual	
CARGO: N.E.	PUNTO DE CAPTACIÓN: 18/03/21 2 pm 01-01		
DIRECCIÓN: Cl 37 A 47 85 BRR VILLA CAMPESTRE	LUGAR DE RECOGIDA: PAIPA - BOYACÁ		
CIUDAD: BOGOTÁ	COORDENADAS: N: N.E. W: N.E.		
ID. MUESTRA: 21-3617	ALMAC. CONTRAMUESTRA: Análisis FQ: 15 días Análisis MB: 24 horas		

Fisicoquímica									
FECHA DE ANÁLISIS (dd/mm/yyyy)	PARÁMETRO	RESULTADO	LÍMITE DE CUANTIFICACIÓN	INCERTIDUMBRE ±	UNIDADES	TÉCNICA ANALÍTICA	MÉTODO	Resolución 0631 de 2015. Art.15 Valores límites máximos permisibles.	CONFORMIDAD
29/03/2021	Cloruros (A)(O)	5692	19,9	48	mgCl <sup>-</sup> /L	Argentometric Method	SM 4500-Cl-B. Ed 23rd-2017	250	NO CUMPLE
29/03/2021	Sulfatos (A)(O)	<8,90	8,90	NO APLICA	mg SO4 <sup>2-</sup> /L	Turbidimetric Method	SM 4500 SO4-2- E. Ed 23rd-2017	250	CUMPLE

(A) Parámetro acreditado por IDEAM bajo Resolución 0196 del 9 de marzo de 2021

\* Análisis subcontratados  
Formato de fecha: dd/mm/yyyy

Los resultados de los análisis presentan una incertidumbre que ha sido estimada a través de la confirmación del método, dicha incertidumbre se tiene en cuenta para establecer la conformidad de un resultado.  
La regla de decisión aplicada por BIOPOLAB para establecer la conformidad de un resultado en comparación con una norma de referencia, se basa en la guía ILAC-G8:09/2019. Guía para establecer reglas de decisión, teniendo como punto base el numeral 4.1 Declaración Binaria de aceptación simple, donde la probabilidad de que el resultado este por fuera del límite de tolerancia puede ser hasta del 50% para los casos en que éste se encuentre en el límite establecido por la norma de referencia. "En el caso en que la regla de decisión no se ajuste a las necesidades o requerimientos del cliente, se establecerá una regla de decisión diferente de mutuo acuerdo".

Resolución 631 de 2015, "Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones."

- Este informe de resultados no se puede reproducir y solo aplica para los resultados de la muestra analizada.
- Cualquier inquietud o reclamación puede ser presentada a nuestra compañía ya sea vía telefónico o al correo e inmediatamente sera atendida.
- La muestra será almacenada 15 días para eventuales repeticiones o inquietudes con los análisis y resultados.

Documento aprobado por:

  
 Xaciver Alfonso Galindo Velasquez  
 Gerente Técnico  
 P. Químico, Matricula Profesional PQ - 07773

Fecha de expedición: 6/04/2021 FIN DEL INFORME Elaborado por: Luis Alexander Torres

## ANEXO 3.

### RESULTADOS DE ANÁLISIS DE AGUAS 18/03/21 HORA:4 PM



Código: F-03-02  
Versión: 3  
Fecha: 10/12/2020

#### RESULTADOS DE ANÁLISIS AGUAS

INFORME DE RESULTADOS N°: 60541			
CLIENTE: MARIANA FORERO MOSQUERA	CANTIDAD: 400	RESPONSABLE MUESTREO: CLIENTE	
NI: 1015476068-9	FECHA DE MUESTREO: 19/03/2021	T (° C) MUESTREO: N.E.	
TELÉFONO: 3176678628	FECHA DE RECIBIDO: 24/03/2021	DESCRIPCIÓN: AR=D	
CONTACTO: Mariana Forero Mosquera	ODS: 21-1870	TIPO DE MUESTREO: Puntual	
CARGO: N.E.	TIPO DE EMPAQUE: PET		
DIRECCIÓN: CL 37 A 47 85 BRR VILLA CAMPESTRE	PUNTO DE CAPTACIÓN: 18/03/21 4 pm 01-03		
CIUDAD: BOGOTA	LUGAR DE RECOGIDA: PAIPA - BOYACÁ		
ID. MUESTRA: 21-3618	COORDENADAS: N: N.E. W: N.E.		
ALMAC. CONTRAMUESTRA: Análisis FQ: 15 días Análisis MB: 24 horas			

Fisicoquímica									
FECHA DE ANÁLISIS (dd/mm/yyyy)	PARÁMETRO	RESULTADO	LÍMITE DE CUANTIFICACIÓN	INCERTIDUMBRE z	UNIDADES	TÉCNICA ANÁLITICA	MÉTODO	Resolución 0631 de 2015. Art.15 Valores límites máximos permisibles.	CONFORMIDAD
29/03/2021	Cloruros (A)(O)	4683	19.5	39.284	mgCl <sub>2</sub> /L	Argentometric Method	SM 4500-Cl- B. Ed 23rd-2017	250	NO CUMPLE
29/03/2021	Sulfatos (A)(O)	<8.90	6.90	NO APLICA	mg SO4 <sup>2-</sup> /L	Turbidimetric Method	SM 4500 SO4 <sup>2-</sup> - E. Ed 23rd-2017	250	CUMPLE

(A) Parámetro acreditado por IDEAM bajo Resolución 0196 del 9 de marzo de 2021

\* Análisis subcontratados

Formato de fecha: dd/mm/yyyy

Los resultados de los análisis presentan una incertidumbre que ha sido estimada a través de la confirmación del método, dicha incertidumbre se tiene en cuenta para establecer la conformidad de un resultado.

La regla de decisión aplicada por BIOPOLAB para establecer la conformidad de un resultado en comparación con una norma de referencia, se basa en la guía ILAC-G8-09/2019. Guía para establecer reglas de decisión, teniendo como punto base el numeral 4.1 Declaración Binaria de aceptación simple, donde la probabilidad de que el resultado este por fuera del límite de tolerancia puede ser hasta del 50% para los casos en que éste se encuentre en el límite establecido por la norma de decisión. "En el caso en que la regla de decisión no se ajuste a las necesidades o requerimientos del cliente, se establecerá una regla de decisión diferente de mutuo acuerdo".

Resolución 631 de 2015. "Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones."

- Este informe de resultados no se puede reproducir y solo aplica para los resultados de la muestra analizada.
- Cualquier inquietud o reclamación puede ser presentada a nuestra compañía ya sea vía telefónica o al correo e inmediatamente sera atendida.
- La muestra será almacenada 15 días para eventuales repeticiones o inquietudes con los análisis y resultados.

Documento aprobado por:

  
 Xavyer Alfonso Galindo Velásquez  
 Gerente Técnico  
 P. Químico. Matricula Profesional PQ - 07773

Fecha de expedición:

6/04/2021

FIN DEL INFORME

Elaborado por:

Luis Alexander Torres

## ANEXO 4.

### RESULTADOS DE ANÁLISIS DE AGUAS 18/03/21 HORA:6 PM



Código: F-03-02  
Versión: 3  
Fecha: 12/12/2020

#### RESULTADOS DE ANÁLISIS AGUAS

INFORME DE RESULTADOS Nº: 00542			
CLIENTE: MARIANA FORERO MOSQUERA	CANTIDAD: 400	RESPONSABLE MUESTREO: Cliente	
NIT: 1015476068-9	COTIZACIÓN Nº: 21R-530	FECHA DE MUESTREO: 18/03/2021	T (° C) MUESTREO: N.E
TELÉFONO: 3176678628	ODS: 21-1870	FECHA DE RECIBIDO: 24/03/2021	DESCRIPCIÓN: AR-D
CONTACTO: Mariana Forero Mosquera		TIPO DE EMPAQUE: PET	TIPO DE MUESTREO: Puntual
CARGO: N.E.		PUNTO DE CAPTACIÓN: 18/03/21 6 pm 01-05	
DIRECCIÓN: CL 37 A 47 85 BRR VILLA CAMPESTRE		LUGAR DE RECOGIDA: PAIPA - BOYACÁ	
CIUDAD: BOGOTÁ		COORDENADAS: N: N.E W: N.E	
ID. MUESTRA: 21-3619		ALMAC. CONTRAMUESTRA: Análisis FQ: 15 días Análisis MB: 24 horas	

FECHA DE ANÁLISIS (dd/mm/yyyy)	PARÁMETRO	RESULTADO	LÍMITE DE CUANTIFICACIÓN	INCERTIDUMBRE ±	UNIDADES	TÉCNICA ANALÍTICA	MÉTODO	Resolución 0631 de 2015. Art. 15 Valores límites máximos permisibles.	CONFORMIDAD
29/03/2021	Cloruros (A)(O)	5572	19,9	47	mgCl <sup>-</sup> /L	Argentometric Method	SM 4500-Cl-B. Ed 23rd-2017	250	NO CUMPLE
29/03/2021	Sulfatos (A)(O)	+8.90	8.90	NO APLICA	mg SO4 <sup>2-</sup> /L	Turbidimetric Method	SM 4500 SO4 <sup>2-</sup> -E. Ed 23rd-2017	250	CUMPLE

(A) Parámetro acreditado por IDEAM bajo Resolución 0196 del 9 de marzo de 2021

\* Análisis subcontratados

Formato de fecha: dd/mm/yyyy

Los resultados de los análisis presentan una incertidumbre que ha sido estimada a través de la confirmación del método, dicha incertidumbre se tiene en cuenta para establecer la conformidad de un resultado.

La regla de decisión aplicada por BIOPOLAB para establecer la conformidad de un resultado en comparación con una norma de referencia, se basa en la guía ILAC-G8-09/2019. Guía para establecer reglas de decisión, teniendo como punto base el numeral 4.1 Declaración Binaria de aceptación simple, donde la probabilidad de que el resultado este por fuera del límite de tolerancia puede ser hasta del 50% para los casos en que éste se encuentre en el límite establecido por la norma de referencia. "En el caso en que la regla de decisión no se ajuste a las necesidades o requerimientos del cliente, se establecerá una regla de decisión diferente de mutuo acuerdo".

Resolución 631 de 2015. "Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones."

- Este informe de resultados no se puede reproducir y solo aplica para los resultados de la muestra analizada.
- Cualquier inquietud o reclamación puede ser presentada a nuestra compañía ya sea vía telefónico o al correo e inmediatamente sera atendida.
- La muestra será almacenada 15 días para eventuales repeticiones o inquietudes con los análisis y resultados.

Documento aprobado por:

  
 Xavyer Alfonso Gajardo Velasquez  
 Gerente Técnico  
 P. Químico. Matriciada Profesional PQ - 07773

Fecha de expedición: 6/04/2021 FIN DEL INFORME Elaborado por: Luis Alexander Torres

## ANEXO 5.

### RESULTADOS DE ANÁLISIS DE AGUAS 19/03/21 HORA:8 AM



Código: F-08-02  
Versión: 3  
Fecha: 12/12/2020

#### RESULTADOS DE ANÁLISIS AGUAS

INFORME DE RESULTADOS N°: 60543			
CLIENTE: MARIANA FORERO MOSQUERA	CANTIDAD: 400	RESPONSABLE MUESTREO: Cliente	
NTI: 1015478068-9	COTIZACIÓN N°: 21R-530	FECHA DE MUESTREO: 19/03/2021	T (° C) MUESTREO: N.E.
TELÉFONO: 3179678628	ODS: 21-1870	FECHA DE RECIBIDO: 24/03/2021	DESCRIPCIÓN: AR+D
CONTACTO: Mariana Forero Mosquera		TIPO DE EMPAQUE: PET	TIPO DE MUESTREO: Puntual
CARGO: N.E.		PUNTO DE CAPTACIÓN: 19/03/21 8 am 02-01	
DIRECCIÓN: CL 37 A 47 85 BRR VILLA CAMPESTRE		LUGAR DE RECOGIDA: PAIPA - BOYACÁ	
CIUDAD: BOGOTÁ		COORDENADAS: N: N.E. W: N.E.	
ID. MUESTRA: 21-3620		ALMAC. CONTRAMUESTRA: Análisis FQ: 15 días	Análisis MB: 24 horas

FECHA DE ANÁLISIS (dd/mm/yyyy)	PARÁMETRO	RESULTADO	LÍMITE DE CUANTIFICACIÓN	INCERTIDUMBRE ±	UNIDADES	TÉCNICA ANALÍTICA	MÉTODO	Resolución 0631 de 2015. Art.15 Valores límites máximos permisibles.	CONFORMIDAD
29/03/2021	Cloruros (A)(O)	4155	19.9	35	mgCl <sub>2</sub> /L	Argentometric Method.	SM 4500-Cl <sub>2</sub> -B. Ed 23rd-2017	250	NO CUMPLE
29/03/2021	Sulfatos (A)(O)	<8.90	8.90	NO APLICA	mg SO4 <sup>2-</sup> /L	Turbidimetric Method	SM 4500 SO4 <sup>2-</sup> -E. Ed 23rd-2017	250	CUMPLE

(A) Parámetro acreditado por IDEAM bajo Resolución 0196 del 9 de marzo de 2021

\* Análisis subcontratados  
Formato de fecha: dd/mm/yyyy

Los resultados de los análisis presentan una incertidumbre que ha sido estimada a través de la confirmación del método, dicha incertidumbre se tiene en cuenta para establecer la conformidad de un resultado.

La regla de decisión aplicada por BIOPOLAB para establecer la conformidad de un resultado en comparación con una norma de referencia, se basa en la guía ILAC-G8:09/2019. Guía para establecer reglas de decisión, teniendo como punto base el numeral 4.1. Declaración Binaria de aceptación simple, donde la probabilidad de que el resultado este por fuera del límite de tolerancia puede ser hasta del 50% para los casos en que éste se encuentre en el límite establecido por la norma de referencia. "En el caso en que la regla de decisión no se ajuste a las necesidades o requerimientos del cliente, se establecerá una regla de decisión diferente de mutuo acuerdo".

Resolución 631 de 2015. "Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones."

- Este informe de resultados no se puede reproducir y solo aplica para los resultados de la muestra analizada.
- Cualquier inquietud o reclamación puede ser presentada a nuestra compañía ya sea vía telefónico o al correo e inmediatamente sera atendida.
- La muestra será almacenada 15 días para eventuales repeticiones o inquietudes con los análisis y resultados.

Documento aprobado por:

  
 Xacyer Alfonso Galvira Velazquez  
 Gerente Técnico  
 P. Químico. Matricula Profesional PQ - 07773

Fecha de expedición:

6/04/2021

FIN DEL INFORME

Elaborado por:

Luis Alexander Torres

## ANEXO 6.

### RESULTADOS DE ANÁLISIS DE AGUAS 19/03/21 HORA:10 AM



Código: F-08-02  
Versión: 3  
Fecha: 15/12/2020

#### RESULTADOS DE ANÁLISIS AGUAS

INFORME DE RESULTADOS N°: 60544			
CLIENTE: MARIANA FORERO MOSQUERA	CANTIDAD: 400	RESPONSABLE MUESTREO: CLIENTE	
NIT: 1015478068-9	COTIZACIÓN N°: 21R-530	FECHA DE MUESTREO: 19/03/2021	T (° C) MUESTREO: N.E.
TELÉFONO: 3176678628	ODS: 21-1870	FECHA DE RECIBIDO: 24/03/2021	DESCRIPCIÓN: ARnD
CONTACTO: Mariana Forero Mosquera		TIPO DE EMPAQUE: PET	TIPO DE MUESTREO: Puntual
CARGO: N.E.		PUNTO DE CAPTACIÓN: 19/03/21 10 am 02-02	
DIRECCIÓN: CL 37 A 47 85 BRR VILLA CAMPESTRE		LUGAR DE RECOGIDA: PAIPA - BOYACÁ	
CUIDAD: BOGOTÁ		COORDENADAS: N: N.E. W: N.E.	
ID. MUESTRA: 21-3621		ALMAC. CONTRAMUESTRA: Análisis FQ: 15 días	Análisis MB: 24 horas

Fisicoquímicas									
FECHA DE ANÁLISIS (dd/mm/yyyy)	PARÁMETRO	RESULTADO	LÍMITE DE CUANTIFICACIÓN	INCERTIDUMBRE ±	UNIDADES	TÉCNICA ANALÍTICA	MÉTODO	Resolución 0631 de 2015. Art.15 Valores límites máximos permisibles.	CONFORMIDAD
29/03/2021	Cloruros (A)(O)	4539	19.9	38	mgCl <sub>2</sub> /L	Argentometric Method	SM 4500-Cl- B. Ed 23rd-2017	250	NO CUMPLE
29/03/2021	Sulfatos (A)(O)	<8.90	8.90	NO APLICA	mg SO42 - /L	Turbidimetric Method	SM 4500 SO42- E. Ed 23rd-2017	250	CUMPLE

(A) Parámetro acreditado por IDEAM bajo Resolución 0196 del 9 de marzo de 2021  
\* Análisis subcontratados

Formato de fecha: dd/mm/yyyy

Los resultados de los análisis presentan una incertidumbre que ha sido estimada a través de la confirmación del método, dicha incertidumbre se tiene en cuenta para establecer la conformidad de un resultado.

La regla de decisión aplicada por BIOPOLAB para establecer la conformidad de un resultado en comparación con una norma de referencia, se basa en la guía ILAC-G8-09/2019. Guía para establecer reglas de decisión, teniendo como punto base el numeral 4.1. Declaración Binaria de aceptación simple, donde la probabilidad de que el resultado este por fuera del límite de tolerancia puede ser hasta del 50% para los casos en que éste se encuentre en el límite establecido por la norma de referencia. "En el caso en que la regla de decisión no se ajuste a las necesidades o requerimientos del cliente, se establecerá una regla de decisión diferente de mutuo acuerdo".

Resolución 631 de 2015, "Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones."

- Este informe de resultados no se puede reproducir y solo aplica para los resultados de la muestra analizada.
- Cualquier inquietud o reclamación puede ser presentada a nuestra compañía ya sea vía telefónico o al correo e inmediatamente sera atendida.
- La muestra será almacenada 15 días para eventuales repeticiones o inquietudes con los análisis y resultados.

Documento aprobado por:

  
 Xacyer Alfonso Galindo Velasquez  
 Gerente Técnico  
 P. Químico. Matrícula Profesional FQ - 07773

Fecha de expedición:

6/04/2021

FIN DEL INFORME

Elaborado por:

Luis Alexander Torres

## ANEXO 7.

### RESULTADOS DE ANÁLISIS DE AGUAS 19/03/21 HORA:2 PM



Código: P-09-02  
Versión: 3  
Fecha: 13/12/2020

#### RESULTADOS DE ANÁLISIS AGUAS

INFORME DE RESULTADOS N°: 60545			
CLIENTE: MARIANA FORERO MOSQUERA	CANTIDAD: 400	RESPONSABLE MUESTREO: CLIENTE	
MIT: 1015479066-9	COTIZACIÓN N°: 21R-530	FECHA DE MUESTREO: 19/03/2021	T (° C) MUESTREO: N.E.
TELÉFONO: 3176679628	ODS: 21-1870	FECHA DE RECIBIDO: 24/03/2021	DESCRIPCIÓN: ARnD
CONTACTO: Mariana Forero Mosquera		TIPO DE EMPAQUE: PET	TIPO DE MUESTREO: Puntual
CARGO: N.E.		PUNTO DE CAPTACIÓN: 19/03/21 2 pm 02-05	
DIRECCIÓN: CL 37 A 47 85 BRR VILLA CAMPESTRE		LUGAR DE RECOGIDA: PAIPA - BOYACÁ	
CIUDAD: BOGOTÁ		COORDENADAS: N: N.E. W: N.E.	
ID. MUESTRA: 21-3622		ALMAC. CONTRAMUESTRA: Análisis FQ: 15 días	Análisis MB: 24 horas

FECHA DE ANÁLISIS (dd/mm/yyyy)	PARÁMETRO	RESULTADO	LÍMITE DE CUANTIFICACIÓN	INCERTIDUMBRE ±	UNIDADES	TÉCNICA ANALÍTICA	MÉTODO	Resolución 0631 de 2015. Art.15 Valores límites máximos permisibles.	CONFORMIDAD
29/03/2021	Cloruros (A)(O)	5284	19.9	44	mgCl <sub>2</sub> /L	Argentometric Method.	SM 4500-Cl- B. Ed 23rd-2017	250	NO CUMPLE
29/03/2021	Sulfatos (A)(O)	<8.90	8.90	NO APLICA	mg SO42 - /L	Turbidimetric Method	SM 4500 SO42- E. Ed 23rd-2017	250	CUMPLE

(A) Parámetro acreditado por IDEAM bajo Resolución 0196 del 9 de marzo de 2021

\* Análisis subcontratados

Formato de fecha: dd/mm/yyyy


Los resultados de los análisis presentan una incertidumbre que ha sido estimada a través de la confirmación del método, dicha incertidumbre se tiene en cuenta para establecer la conformidad de un resultado.

La regla de decisión aplicada por BIOPOLAB para establecer la conformidad de un resultado en comparación con una norma de referencia, se basa en la guía ILAC-G8:09/2019. Guía para establecer reglas de decisión, teniendo como punto base el numeral 4.1 Declaración binaria de aceptación simple, donde la probabilidad de que el resultado este por fuera del límite de tolerancia puede ser hasta del 50% para los casos en que éste se encuentre en el límite establecido por la norma de referencia. "En el caso en que la regla de decisión no se ajuste a las necesidades o requerimientos del cliente, se establecerá una regla de decisión diferente de mutuo acuerdo".

Resolución 631 de 2015, "Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones."

- Este informe de resultados no se puede reproducir y solo aplica para los resultados de la muestra analizada.
- Cualquier inquietud o reclamación puede ser presentada a nuestra compañía ya sea vía telefónico o al correo e inmediatamente sera atendida.
- La muestra será almacenada 15 días para eventuales repeticiones o inquietudes con los análisis y resultados.

Documento aprobado por:

  
 Xavier Alfonso Galindo Velasquez  
 Gerente Técnico  
 P. Químico, Matricula Profesional PQ - 07773

Fecha de expedición:

6/04/2021

FIN DEL INFORME

Elaborado por:

Luis Alexander Torres

## ANEXO 8.

### RESULTADOS DE ANÁLISIS DE AGUAS 20/03/21 HORA:8 AM



Código: 1-03-02  
Versión: 3  
Fecha: 15/12/2020

#### RESULTADOS DE ANÁLISIS AGUAS

INFORME DE RESULTADOS N°: 60546			
CLIENTE: MARIANA FORERO MOSQUERA	CANTIDAD: 400	RESPONSABLE MUESTREO: Cliente	
NIT: 1015476068-9	COTIZACIÓN N°: 21R-530	FECHA DE MUESTREO: 19/03/2021	T (° C) MUESTREO: N.E.
TELÉFONO: 3176678628	ODS: 21-1870	FECHA DE RECIBIDO: 24/03/2021	DESCRIPCIÓN: ARnD
CONTACTO: Mariana Forero Mosquera		TIPO DE EMPAQUE: PET	TIPO DE MUESTREO: Puntual
CARGO: N.E.		PUNTO DE CAPTACIÓN: 20/03/21 8am 03-01	
DIRECCIÓN: CL 37 A 47 85 BRR VILLA CAMPESTRE		LUGAR DE RECOGIDA: PAIPA - BOYACÁ	
CIUDAD: BOGOTÁ		COORDENADAS: N: N.E. W: N.E.	
ID. MUESTRA: 21-3623	ALMAC. CONTRAMUESTRA: Análisis FQ: 15 días Análisis MB: 24 horas		

Fisicoquímica									
FECHA DE ANÁLISIS (dd/mm/yyyy)	PARÁMETRO	RESULTADO	LÍMITE DE CUANTIFICACIÓN	INCERTIDUMBRE ±	UNIDADES	TÉCNICA ANALÍTICA	MÉTODO	Resolución 0631 de 2015. Art. 15 Valores límites máximos permisibles.	CONFORMIDAD
29/03/2021	Cloruros (A)(O)	5524	19.9	46	mgCl <sub>2</sub> /L	Argentometric Method	SM 4500-Cl <sub>2</sub> -B. Ed 23rd-2017	250	NO CUMPLE
29/03/2021	Sulfatos (A)(O)	<8.90	8.90	NO APLICA	mg SO <sub>4</sub> 2 <sup>-</sup> /L	Turbidimetric Method	SM 4500 SO <sub>4</sub> 2 <sup>-</sup> -E. Ed 23rd-2017	250	CUMPLE

(A) Parámetro acreditado por IDEAM bajo Resolución 0196 del 9 de marzo de 2021

\* Análisis subcontratados

Formato de fecha: dd/mm/yyyy

Los resultados de los análisis presentan una incertidumbre que ha sido estimada a través de la confirmación del método, dicha incertidumbre se tiene en cuenta para establecer la conformidad de un resultado.

La regla de decisión aplicada por BIOPOLAB para establecer la conformidad de un resultado en comparación con una norma de referencia, se basa en la guía ILAC-G8:09/2019. Guía para establecer reglas de decisión, teniendo como punto base el numeral 4.1 Declaración Binaria de aceptación simple, donde la probabilidad de que el resultado este por fuera del límite de tolerancia puede ser hasta del 50% para los casos en que éste se encuentre en el límite establecido por la norma de referencia. "En el caso en que la regla de decisión no se ajuste a las necesidades o requerimientos del cliente, se establecerá una regla de decisión diferente de mutuo acuerdo".

Resolución 631 de 2015. "Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones."

- Este informe de resultados no se puede reproducir y solo aplica para los resultados de la muestra analizada.
- Cualquier inquietud o reclamación puede ser presentada a nuestra compañía ya sea vía telefónico o al correo e inmediatamente sera atendida.
- La muestra será almacenada 15 días para eventuales repeticiones o inquietudes con los análisis y resultados.

Documento aprobado por:

  
 Xacvier Alfonso Gajardo Velasquez  
 Gerente Técnico  
 P. Químico. Matrícula Profesional PQ - 07773

Fecha de expedición:

6/04/2021

FIN DEL INFORME

Elaborado por:

Luis Alexander Torres



## ANEXO 9.

### RESULTADOS DE ANÁLISIS DE AGUAS 20/03/21 HORA:10 AM



Código: F-08-02  
Versión: 3  
Fecha: 10/12/2020

#### RESULTADOS DE ANÁLISIS AGUAS

INFORME DE RESULTADOS N°: 60547			
CLIENTE: MARIANA FORERO MOSQUERA	CANTIDAD: 400	RESPONSABLE MUESTREO: Cliente	
NIT: 1015476068-9	COTIZACIÓN N°: 21R-530	FECHA DE MUESTREO: 19/03/2021	T (* C) MUESTREO: N.E.
TELÉFONO: 3176678628	ODS: 21-1870	FECHA DE RECIBIDO: 24/03/2021	DESCRIPCIÓN: ARnD
CONTACTO: Mariana Forero Mosquera		TIPO DE EMPAQUE: PET	TIPO DE MUESTREO: Puntual
CARGO: N.E.		PUNTO DE CAPTACIÓN: 20/03/21 10 am 03-02	
DIRECCIÓN: CL 37 A 47 85 BRR VILLA CAMPESTRE		LUGAR DE RECOGIDA: PAIPA - BOYACÁ	
CIUDAD: BOGOTÁ		COORDENADAS: N: N.E. W: N.E.	
ID. MUESTRA: 21-3624		ALMAC. CONTRAMUESTRA: Análisis PQ: 15 días Análisis MB: 24 horas	

Fisicoquímicas									
FECHA DE ANÁLISIS (dd/mm/yyyy)	PARÁMETRO	RESULTADO	LÍMITE DE CUANTIFICACIÓN	INCERTIDUMBRE ±	UNIDADES	TÉCNICA ANALÍTICA	MÉTODO	Resolución 0631 de 2015. Art.15 Valores límites máximos permisibles.	CONFORMIDAD
29/03/2021	Cloruros (A)(O)	4563	19.9	38	mgCl-/L	Argentometric Method.	SM 4500-Cl- B. Ed 23rd-2017	250	NO CUMPLE
29/03/2021	Sulfatos (A)(O)	<8.90	8.90	NO APLICA	mg SO42 - /L	Turbidimetric Method	SM 4500 SO42- E. Ed 23rd-2017	250	CUMPLE

[A] Parámetro acreditado por IDEAM bajo Resolución 0196 del 9 de marzo de 2021

\* Análisis subcontratados

Formato de fecha: dd/mm/yyyy

Los resultados de los análisis presentan una incertidumbre que ha sido estimada a través de la confirmación del método, dicha incertidumbre se tiene en cuenta para establecer la conformidad de un resultado.

La regla de decisión aplicada por BIOPOLAB para establecer la conformidad de un resultado en comparación con una norma de referencia, se basa en la guía ILAC-G8:09/2019. Guía para establecer reglas de decisión, teniendo como punto base el numeral 4.11 Declaración Binaria de aceptación simple, donde la probabilidad de que el resultado este por fuera del límite de tolerancia puede ser hasta del 50% para los casos en que éste se encuentre en el límite establecido por la norma de referencia. "En el caso en que la regla de decisión no se ajuste a las necesidades o requerimientos del cliente, se establecerá una regla de decisión diferente de mutuo acuerdo".

Resolución 631 de 2015, "Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones."

- Este informe de resultados no se puede reproducir y solo aplica para los resultados de la muestra analizada.
- Cualquier inquietud o reclamación puede ser presentada a nuestra compañía ya sea vía telefónico o al correo e inmediatamente sera atendida.
- La muestra será almacenada 15 días para eventuales repeticiones o inquietudes con los análisis y resultados.

Documento aprobado por:

  
Xacvyr Alfonso Gajardo Velasquez  
Gerente Técnico

P. Químico. Matricula Profesional PQ - 07773

Fecha de expedición:

6/04/2021

FIN DEL INFORME

Elaborado por:

Luis Alexander Torres

# ANEXO 10.

## RESULTADOS DE ANÁLISIS DE AGUAS 20/03/21 HORA:12 M



Código: P-08-02  
Versión: 3  
Fecha: 10/12/2020

### RESULTADOS DE ANÁLISIS AGUAS

INFORME DE RESULTADOS N°: 60548			
CLIENTE: MARIANA FORERO MOSQUERA	CANTIDAD: 400	RESPONSABLE MUESTREO: CLIENTE	
NIIT: 1015476068-9	FECHA DE MUESTREO: 19/03/2021	T (* C) MUESTREO: N.E.	
TELÉFONO: 3176678628	FECHA DE RECIBIDO: 24/03/2021	DESCRIPCIÓN: ARND	
CONTACTO: Mariana Forero Mosquera	TIPO DE EMPAQUE: PET	TIPO DE MUESTREO: Puntual	
CARGO: N.E.	PUNTO DE CAPTACIÓN: 20/03/21 12 m 03-03		
DIRECCIÓN: CL 37 A 47 65 BRR VILLA CAMPESTRE	LUGAR DE RECOGIDA: PAIPA - BOYACÁ		
CIUDAD: BOGOTÁ	COORDENADAS: N: N.E. W: N.E.		
ID. MUESTRA: 21-3625	ALMAC. CONTRAMUESTRA: Análisis PQ: 15 días Análisis MB: 24 horas		

Fisicoquímica									
FECHA DE ANÁLISIS (dd/mm/yyyy)	PARÁMETRO	RESULTADO	LÍMITE DE CUANTIFICACIÓN	INCERTIDUMBRE ±	UNIDADES	TÉCNICA ANALÍTICA	MÉTODO	Resolución 0631 de 2015, Art.15 Valores límites máximos permisibles.	CONFORMIDAD
29/03/2021	Cloruros (A)(O)	4755	19.9	40	mgCl <sup>-</sup> /L	Argentometric Method	SM 4500-Cl <sup>-</sup> -B. Ed 23rd-2017	250	NO CUMPLE
29/03/2021	Sulfatos (A)(O)	<8.90	8.90	NO APLICA	mg SO4 <sup>2-</sup> /L	Turbidimetric Method	SM 4500 SO4 <sup>2-</sup> -E. Ed 23rd-2017	250	CUMPLE

[A] Parámetro acreditado por IDEAM bajo Resolución 0196 del 9 de marzo de 2021.

\* Análisis subcontratados

Formato de fecha: dd/mm/yyyy

Los resultados de los análisis presentan una incertidumbre que ha sido estimada a través de la confirmación del método, dicha incertidumbre se tiene en cuenta para establecer la conformidad de un resultado.

La regla de decisión aplicada por BIOPOLAB para establecer la conformidad de un resultado en comparación con una norma de referencia, se basa en la guía ILAC-G8:09/2019. Guía para establecer reglas de decisión, teniendo como punto base el numeral 4.1. Declaración Binaria de aceptación simple, donde la probabilidad de que el resultado este por fuera del límite de tolerancia puede ser hasta del 50% para los casos en que este se encuentre en el límite establecido por la norma de referencia. "En el caso en que la regla de decisión no se ajuste a las necesidades o requerimientos del cliente, se establecerá una regla de decisión diferente de mutuo acuerdo".

Resolución 631 de 2015, "Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones."

- Este informe de resultados no se puede reproducir y solo aplica para los resultados de la muestra analizada.
- Cualquier inquietud o reclamación puede ser presentada a nuestra compañía ya sea vía telefónica o al correo e inmediatamente sera atendida.
- La muestra será almacenada 15 días para eventuales repeticiones o inquietudes con los análisis y resultados.

Documento aprobado por:

  
Xacyle Alfonso Galindo Velasquez  
Gerente Técnico  
P. Químico. Matrícula Profesional PQ - 07773

Fecha de expedición: 6/04/2021 FIN DEL INFORME Elaborado por: Luis Alexander Torres

# ANEXO 11.

## RESULTADOS DE ANÁLISIS DE AGUAS 20/03/21 HORA:4 PM



Código: F-03-02  
Versión: 3  
Fecha: 18/12/2020

### RESULTADOS DE ANÁLISIS AGUAS

INFORME DE RESULTADOS N°: 60549			
CLIENTE: MARIANA FORERO MOSQUERA	CANTIDAD: 400	RESPONSABLE MUESTREO: CLIENTE	
NIT: 1015470068-9	FECHA DE MUESTREO: 19/03/2021	T (° C) MUESTREO: N.E.	
TELÉFONO: 3176678628	FECHA DE RECIBIDO: 24/03/2021	DESCRIPCIÓN: AR+D	
CONTACTO: Mariana Forero Mosquera	TIPO DE EMPAQUE: PET	TIPO DE MUESTREO: Puntual	
CARGO: N.E.	PUNTO DE CAPTACIÓN: 20/03/21 4 pm 03-05		
DIRECCIÓN: CL 37 A 47 85 BRR VILLA CAMPESTRE	LUGAR DE RECOGIDA: PAIPA - BOYACÁ		
CIUDAD: BOGOTÁ	COORDENADAS: N: N.E. W: N.E.		
ID. MUESTRA: 21-3626	ALMAC. CONTRAMUESTRA: Análisis FQ: 15 días Análisis MB: 24 horas		

FECHA DE ANÁLISIS (dd/mm/yyyy)	PARÁMETRO	RESULTADO	LÍMITE DE CUANTIFICACIÓN	INCERTIDUMBRE ±	UNIDADES	TÉCNICA ANALÍTICA	MÉTODO	Resolución 0631 de 2015. Art.15 Valores límites máximos permisibles	CONFORMIDAD
29/03/2021	Cloruros (A)(O)	5764	19.9	48	mgCl-/L	Argentometric Method	SM 4500-Cl- B. Ed 23rd-2017	250	NO CUMPLE
29/03/2021	Sulfatos (A)(O)	-8.90	8.90	NO APLICA	mg SO42 -/L	Turbidimetric Method	SM 4500 SO42- E. Ed 23rd-2017	250	CUMPLE

(A) Parámetro acreditado por IDEAM bajo Resolución 0196 del 9 de marzo de 2021

\* Análisis subcontratados

Formato de fecha: dd/mm/yyyy

Los resultados de los análisis presentan una incertidumbre que ha sido estimada a través de la confirmación del método, dicha incertidumbre se tiene en cuenta para establecer la conformidad de un resultado. La regla de decisión aplicada por BIOPOLAB para establecer la conformidad de un resultado en comparación con una norma de referencia, se basa en la guía ILAC-G8:09/2019. Guía para establecer reglas de decisión, teniendo como punto base el numeral 4.1 Declaración Binaria de aceptación simple, donde la probabilidad de que el resultado este por fuera del límite de tolerancia puede ser hasta del 50% para los casos en que éste se encuentre en el límite establecido por la norma de referencia. "En el caso en que la regla de decisión no se ajuste a las necesidades o requerimientos del cliente, se establecerá una regla de decisión diferente de mutuo acuerdo".

Resolución 631 de 2015. "Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones."

- Este informe de resultados no se puede reproducir y solo aplica para los resultados de la muestra analizada.
- Cualquier inquietud o reclamación puede ser presentada a nuestra compañía ya sea vía telefónico o al correo e inmediatamente sera atendida.
- La muestra será almacenada 15 días para eventuales repeticiones o inquietudes con los análisis y resultados.

Documento aprobado por:

Xacvier Alfonso Gajardo Velasquez  
Gerente Técnico  
P. Químico, Matricula Profesional PQ - 07773

Fecha de expedición:

6/04/2021

FIN DEL INFORME

Elaborado por:

Luis Alexander Torres

## ANEXO 12.

### RESULTADOS DE ANÁLISIS DE AGUAS 20/03/21 HORA:6 PM



Código: F-09-02  
Versión: 3  
Fecha: 15/12/2020

#### RESULTADOS DE ANÁLISIS AGUAS

INFORME DE RESULTADOS N°:				60550			
CLIENTE:	MARIANA FORERO MOSQUERA	COTIZACIÓN N°:	21R-530	CANTIDAD:	400	RESPONSABLE MUESTREO:	CLIENTE
NIT:	1015476068-9	ODS:	21-1870	FECHA DE MUESTREO:	19/03/2021	T (* C) MUESTREO:	N.E.
TÉLFONO:	3176678628			FECHA DE RECIBIDO:	24/03/2021	DESCRIPCIÓN:	ARnD
CONTACTO:	Mariana Forero Mosquera			TIPO DE EMPAQUE:	PET	TIPO DE MUESTREO:	PUNTUAL
CARGO:	N.E.			PUNTO DE CAPTACIÓN:	20/03/21 6 pm 03-07		
DIRECCIÓN:	CL 37 A 47 85 BRR VILLA CAMPESTRE			LUGAR DE RECOGIDA:	PAIPA - BOYACÁ		
CIUDAD:	BOGOTA			COORDENADAS:		N: N.E.	W: N.E.
ID. MUESTRA:	21-3627			ALMAC. CONTRAMUESTRA:	Análisis FQ: 15 días	Análisis MB: 24 horas	

FECHA DE ANÁLISIS (dd/mm/yyyy)	PARÁMETRO	RESULTADO	LÍMITE DE CUANTIFICACIÓN	INCERTIDUMBRE ±	UNIDADES	TÉCNICA ANALÍTICA	MÉTODO	Resolución 0631 de 2015, Art.15 Valores límites máximos permisióables.	CONFORMIDAD
29/03/2021	Cloruros (Al)O	6389	19.9	54	mgCl-/L	Argentometric Method.	SM 4500-Cl- B. Ed 23rd-2017	250	NO CUMPLE
29/03/2021	Sulfatos (Al)O	<8,90	8,90	NO APLICA	mg SO42 - /L	Turbidimetric Method	SM 4500 SO42- E. Ed 23rd-2017	250	CUMPLE

(A) Parámetro acreditado por IDEAM bajo Resolución 0196 del 9 de marzo de 2021  
 \* Análisis subcontratados  
 Formato de fecha: dd/mm/yyyy  
 Los resultados de los análisis presentan una incertidumbre que ha sido estimada a través de la confirmación del método, dicha incertidumbre se tiene en cuenta para establecer la conformidad de un resultado.  
 La regla de decisión aplicada por BIOPOLAB para establecer la conformidad de un resultado en comparación con una norma de referencia, se basa en la guía ILAC-G8.09/2019. Guía para establecer reglas de decisión, teniendo como punto base el numeral 4.1. Declaración Binaria de aceptación simple, donde la probabilidad de que el resultado este por fuera del límite de tolerancia puede ser hasta del 50% para los casos en que éste se encuentre en el límite establecido por la norma de referencia. "En el caso en que la regla de decisión no se ajuste a las necesidades o requerimientos del cliente, se establecerá una regla de decisión diferente de mutuo acuerdo".

Resolución 631 de 2015, "Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisióables en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones."  
 - Este informe de resultados no se puede reproducir y solo aplica para los resultados de la muestra analizada.  
 - Cualquier inquietud o reclamación puede ser presentada a nuestra compañía ya sea vía telefónico o al correo e inmediatamente sera atendida.  
 - La muestra será almacenada 15 días para eventuales repeticiones o inquietudes con los análisis y resultados.

Documento aprobado por:

  
 Xacyle Alfonso Galindo Velasquez  
 Gerente Técnico  
 P. Químico, Matrícula Profesional PQ - 07773

Fecha de expedición:

6/04/2021

FIN DEL INFORME

Elaborado por:

Luis Alexander Torres

## ANEXO 13.

### INFORMACIÓN DE ENCUESTADOS

Marca temporal	Nombre y Apellido	Área de ocupación	Cargo (Opcional)
18/04/2021	Luis Eduardo Sabogal Monroy	Ingeniería y afines	Gerente Comercial
18/04/2021	Jose cucunuba	Ingeniería y afines	Especialista iwt lipesa
19/04/2021	Diego Andrés Mojica	Ingeniería y afines	-
19/04/2021	Rubén Darío Gómez	Ingeniería y afines	Ingeniero de proyectos
19/04/2021	Iván Ramírez Marín	Ingeniería y afines	-
19/04/2021	Oscar Lombana	Ingeniería y afines	-
19/04/2021	Maria Paula Gallego	Ingeniería y afines	Empresaria
19/04/2021	David Leonardo Sotelo	Ingeniería y afines	Docente de planta
19/04/2021	Gloria patricia forero s	Administrativo	Bacteriologa
20/04/2021	Andrés Triana	Investigación y academia	Docente
20/04/2021	María Camila Rayo	Ingeniería y afines	-
28/04/2021	Paula Daniela Medina Camargo	Ingeniería y afines	Asesor Ambiental
29/04/2021	María José Méndez	Ingeniería y afines	-
30/04/2021	Camilo Noreña Aguirre	Ingeniería y afines	Docente
30/04/2021	Helmer Andrés Perez	Ingeniería y afines	Ingeniero de Procesos
30/04/2021	Luis Miguel Rodríguez Idarraga	Ingeniería y afines	-
03/05/2021	Sara Verá Torres	Ingeniería y afines	Consultor en válida
03/05/2021	Héctor Meza	Investigación y academia	Asesor
04/05/2021	Manuela Gómez Ortega	Ingeniería y afines	Ingeniera química
04/05/2021	Andrea Ramírez Palomino	Ingeniería y afines	Ejecutivo comercial
06/05/2021	Luis Figueroa	Ingeniería y afines	Gerente de proyectos
07/05/2021	Harvey Arévalo	Ingeniería y afines	Ingeniero químico

## ANEXO 14.

### SECUENCIAMIENTO DE TRATAMIENTO DE AGUAS PARA IMPLEMENTACIÓN EM EL ITP

