

**PROPUESTA DE TRATAMIENTO DE VERTIMIENTOS PROVENIENTES DE
TERMALES DEL MUNICIPIO DE PAIPA, A TRAVÉS DE POTENCIALES MEDIOS
ADSORBENTES GENERADOS CON BASE EN RECURSOS NATURALES Y
RESIDUOS AGROPECUARIOS DISPONIBLES EN LA PROVINCIA DE TUNDAMA
EN EL DEPARTAMENTO DE BOYACÁ.**

**MANUELITA PEÑA ROJAS
SAMANTHA URREGO ANGEL**

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

**DIRECTOR
JUAN CAMILO CELY GARZÓN
INGENIERO QUÍMICO**

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

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

2022

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del director

Firma del presidente jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

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

Dr. ALEXANDRA MEJÍA GUZMÁN

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. RICARDO ALFONSO PEÑARANDA CASTRO

Secretario general

Dr. JOSE LUIS MACIAS RODRIGUEZ

Decana de Facultad Ingenierías

Ing. NALINY PATRICIA GUERRA PRIETO

Director Programa de Ingeniería Química Ing.

NUBIA LILIANA BECERRA OSPINA

AGRADECIMIENTOS

Las autoras expresan su agradecimiento a:

Juan Camilo Cely, Ingeniero Químico y director de trabajo de grado, por sus aportes, orientación y conocimiento a lo largo del desarrollo de este trabajo.

Iván Ramírez, por las ayudas brindadas y por su conocimiento y experiencia en el área de investigación.

A la Universidad de América por acogernos durante toda nuestra carrera y permitir nuestra formación como Ingenieras Químicas.

Al alcalde Fabio Medrano y la gerencia del ITP que estuvo a cargo de coordinar las actividades del primer periodo del 2022 por su colaboración y apoyo durante las campañas realizadas en el instituto.

DEDICATORIA

Le agradezco a Dios, primeramente, por guiarme en cada uno de los pasos he dado, por permitirme llegar hasta donde estoy y por llenarme de bendiciones a lo largo de mi carrera. A mi madre Martha Angel la cual es mi ejemplo a seguir, por siempre darme fortaleza y ser mi motor todos los días, a mi padre Nelson Urrego quien me apoyo diariamente en mis decisiones, me enseñó el valor de mi trabajo, a respetarme y valorarme, a mi hermano Arnhol quien me ayudo en mis momentos difíciles, a Matías por ser mi compañero fiel en todas los días y noches de estudio. Finalmente, a las amistades que forme durante este camino, con las cuales espero seguir en unión muchos años más, debido a que fueron mi segunda familia y me dejaron los recuerdos más lindos de estos años.

Samantha Urrego Ángel

DEDICATORIA

En primer lugar, quiero darle las gracias a Dios y a la vida por llenarme de infinidad de bendiciones, salud, y sabiduría a lo largo del desarrollo y finalmente culminación de mi carrera como ingeniera química. A mi mamá, María Fernanda, por estar siempre dispuesta a escucharme y apoyarme en los momentos más difíciles, por ser mi ejemplo a seguir, por ser la mejor mamá. A mi papá, Mario Peña, porque siempre creyó en mí y en mis capacidades como persona, por recordarme lo valiosa que soy y por demostrármelo cada día y en cada llamada desde la distancia. A mis hermanos, María José y Juan Mario, porque sin ellos no hubiese podido superar muchos de los obstáculos que se me presentaron en el camino, por acompañarme y por demostrarme su amor con acciones.

Por último, a mi mejor amiga, Jolaine, por nunca dejarme decaer, por darme ánimo cuando me quería rendir, por escucharme mil veces las mismas historias, por aconsejarme y estar en todo momento para mí, por brindarme la amistad más sincera que alguien puede ofrecer. Gracias a ustedes me he convertido en la persona que hoy soy.

Manuelita Peña Rojas

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

RESUMEN	15
INTRODUCCIÓN	16
OBJETIVOS	19
Objetivo general	19
Objetivos específicos	19
1. CONTEXTUALIZACIÓN ACERCA DE LA CONTAMINACIÓN EN AGUAS POR DESCARGAS PROVENIENTES DE INSTITUTOS TERMALES	20
1.1. Aguas termales	20
1.1.1. <i>Cloruradas</i>	20
1.1.2. <i>Sulfatadas</i>	20
1.1.3. <i>Bicarbonatadas</i>	20
1.1.4. <i>Mixtas con relación a los aniones</i>	20
1.2. Tratamiento de aguas	21
1.2.1. <i>Tratamiento primario</i>	21
1.2.2. <i>Tratamiento secundario</i>	21
1.2.3. <i>Tratamiento terciario</i>	21
1.3. Adsorción (adsorbato y adsorbente)	21
1.3.1. Adsorción física	21
1.4. Parámetros	22
1.4.1. <i>Temperatura</i>	22
1.4.2. <i>pH</i>	22
1.4.3. <i>Conductividad</i>	23
1.4.4. <i>Sólidos suspendidos totales</i>	23
1.4.5. <i>Sólidos Sedimentables</i>	23
1.4.6. <i>Iones cloruro</i>	23
1.4.7. <i>Iones sulfato</i>	23
1.4.8. <i>DBO</i>	23
1.4.9. <i>DQO</i>	24

1.5. Normatividad aplicable	25
2. CARACTERIZAR LAS PROPIEDADES DE LAS AGUAS VERTIDAS PROVENIENTES DE PISCINAS TERMALES DEL INSTITUTO DE TURISMO DE PAIPA (ITP)	28
2.1. Contextualización sobre el origen y características de las aguas termales en Colombia y en el mundo	29
2.2. Comparación de diferentes parámetros de aguas termominerales desde un contexto nacional e internacional	33
2.3. Identificación y descripción de las zonas relacionadas con los vertimientos de las aguas provenientes de las piscinas termales del ITP	35
2.3.1. <i>Paipa, Boyacá</i>	35
2.3.3. <i>Provincia de Tundama</i>	36
2.3.4. <i>Río Chicamocha</i>	37
2.4. Actividades industriales de algunos sectores dentro de la provincia de Tundama	37
2.5. Descripción de la campaña de muestreo realizada en el Instituto de Turismo de Paipa	38
2.5.1 <i>Campaña de muestreo evidenciada en Fase I</i>	39
2.5.2. <i>Campaña de muestreo evidenciada en Fase II</i>	39
2.5.3. <i>Campaña de muestreo Fase III</i>	40
3. IDENTIFICAR LOS RECURSOS NATURALES Y RESIDUOS AGROPECUARIOS CON POTENCIAL DE UTILIZACIÓN COMO MEDIO ADSORBENTE PARA TRATAMIENTO DE VERTIMIENTOS	66
3.1. Potenciales medios adsorbentes a partir de recursos naturales y residuos agropecuarios	66
3.1.1. <i>Cáscara de frutas</i>	67
3.1.2. <i>Zuro de maíz</i>	67
3.1.3. <i>Cascarilla de arroz</i>	68
3.1.6. <i>Hueso de bovino</i>	68
3.1.7. <i>Carbón mineral</i>	69
3.2. Determinación de los recursos naturales y residuos agropecuarios presentes en Tundama	70
3.3. Caracterización de las aguas termominerales según autores	71
4. ESTABLECER UN SECUENCIAMIENTO DE UNIDADES DE SEPARACIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE LOS VERTIMIENTOS DE LAS AGUAS TERMALES SEGÚN LA CARACTERIZACIÓN REALIZADA	75

4.1. Tratamiento de aguas residuales	75
4.1.1. <i>Pretratamiento</i>	75
4.1.2. <i>Tratamiento primario</i>	76
4.1.3. <i>Tratamiento secundario</i>	76
4.1.4. <i>Tratamiento terciario</i>	76
4.2. Identificación de unidades de sistema de separación	77
4.2.1. <i>Filtros para la primera fase de tratamiento</i>	77
4.2.2. <i>Sistema de intercambio iónico</i>	77
4.2.3. <i>La electrocoagulación</i>	79
4.2.4. <i>Ósmosis inversa</i>	81
4.2.5. <i>Electrodialisis (ED) y Electrodialisis inversa (EDR)</i>	83
4.3. Criterios considerados para la selección y evaluación de las alternativas de tratamiento	85
4.4. Selección primera fase de tratamiento	86
4.5. Selección segunda fase de tratamiento	89
4.6. Selección de medios no convencionales	91
4.6.1. <i>Hueso bovino</i>	91
4.6.2. <i>Carbón mineral</i>	95
4.7. Aplicación a escala laboratorio del hueso bovino y el carbón mineral para la adsorción de cloruros y sulfatos	100
4.7.1. <i>Aplicación a escala laboratorio del hueso bovino y el carbón mineral para adsorción de iones cloruro</i>	101
4.7.2. <i>Aplicación a escala laboratorio del hueso bovino para adsorción de iones sulfato</i>	116
4.8. Posible implementación de potenciales medios adsorbentes no convencionales al secuenciamiento de pretratamiento y tratamiento para la remoción de contaminantes provenientes de los vertimientos de las aguas termominerales del ITP	126
CONCLUSIONES	128
RECOMENDACIONES	129
BIBLIOGRAFÍA	130
ANEXOS	150

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.Resolución 0631 Art. 15 Parámetros fisicoquímicos	26
Figura 2.Ubicación del volcán Cerro Machín	30
Figura 3.Ubicación de la Serranía de Perijá y de la Ciénaga Grande de Santa Marta	31
Figura 4. Ubicación de Mubazzarah-Ain Faidha en el Emirato de Abu Dhabi	32
Figura 5.Ubicación de Ain-Khatt en el Emirato de Ras Al-Khaimah	33
Figura 6.Mapa Municipio Paipa	36
Figura 7.Mapa Provincia de Tundama	36
Figura 8.Ubicación geográfica del ITP y los puntos donde se realizó la campaña de muestreo	43
Figura 9.Pozo Azul	43
Figura 10.Piscina Olímpica	44
Figura 11.Piscina Cisnes	44
Figura 12.Piscina Panorámica	44
Figura 13.Canal de Vargas	45
Figura 14.Diagrama de flujo de la recolección de muestras de aguas termominerales	47
Figura 15.Dimensiones de la piscina Olímpica	51
Figura 16.Dimensiones de la piscina Panorámica	52
Figura 17.Dimensiones de la piscina Cisnes	52
Figura 18.Precipitaciones en el mes de abril en el municipio de Paipa	54
Figura 19.Temperatura del mes de marzo 2022	55
Figura 20.Tubo de salida Canal de Vargas	56
Figura 21.Recolección de muestras el día 13 de abril del 2022	57
Figura 22.Recolección de muestras el día 14 de abril del 2022	58
Figura 23.Recolección de muestras el día 15 de abril del 2022	59

Figura 24.Distribución de la red hidráulica del ITP	63
Figura 25.pH de las aguas del Instituto	64
Figura 26.Conductividad eléctrica registrada en la campaña de muestreo	65
Figura 27.Comparación entre un lecho compacto y uno no compacto	78
Figura 28.Reacciones dentro de un reactor de electrocoagulación	80
Figura 29.Comparación entre ósmosis y ósmosis inversa	82
Figura 30.Celda básica de electrodiálisis	84
Figura 31.Diseño de filtro mediante diferentes materiales	87
Figura 32.Componentes y partes anatómicas de un hueso típico largo	92
Figura 33.Tubo pvc con hueso para remoción de contaminantes	94
Figura 34.Huesos de bovino cortados	101
Figura 35.Huesos de bovino lavado y seleccionado para su uso	102
Figura 36.Hueso Molido y pesado	102
Figura 37.Filtración de los huesos presentes en el agua	103
Figura 38.Equipo de espectrofotometría	104
Figura 39.Carbón mineral	104
Figura 40.Filtro al vacío.	106
Figura 41.Gráfica de resultados del método 4500-Cl- E. Automated Ferricyanide Method, para hueso bovino	113
Figura 42.Gráfica de resultados del método 4500-Cl- E. Automated Ferricyanide Method, para Carbón mineral	115
Figura 43.Filtración del hueso a diferentes concentraciones	117
Figura 44.Filtración del carbón a diferentes concentraciones.	118
Figura 45.Curva de calibración	124
Figura 46.Gráfica de concentración del ion sulfato en cada una de las muestras	125

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.Comparación de cuatro parámetros de las aguas termominerales de diferentes zonas de estudio	33
Tabla 2.Clasificación de la precipitación promedio diaria	54
Tabla 3.Resultados obtenidos de la campaña realizada en el Instituto de Turismo de Paipa en el 2022	60
Tabla 4.Parámetros necesarios para caracterizar las aguas termominerales provenientes de los vertimientos del ITP	72
Tabla 5.Iones, partículas y microorganismos retenidos mediante el proceso de ósmosis inversa	82
Tabla 6.Calificación correspondiente para la matriz de selección	88
Tabla 7.Calificación correspondiente para la matriz de selección pretratamiento	88
Tabla 8.Calificación correspondiente para la matriz de selección segundo tratamiento	89
Tabla 9.Composición de un hueso de toro desgrasado y seco	93
Tabla 10.Diferentes tipos de Carbón	95
Tabla 11.Características fisicoquímicas del carbón activado (CAG)	99
Tabla 12.Datos utilizados en el diseño de experimentos para cloruros con el hueso bovino	107
Tabla 13.Parámetros para determinar el coeficiente de variación para cloruros con el hueso bovino	108
Tabla 14.Análisis de varianza de un factor para cloruros con el hueso bovino	108
Tabla 15.Datos utilizados en el diseño de experimentos para cloruros con el carbón mineral	110
Tabla 16.Parámetros para determinar el coeficiente de variación para cloruros con el carbón mineral	111
Tabla 17.Análisis de varianza de un factor para cloruros con el carbón mineral	111

Tabla 18.Resultados del método 4500-Cl- E. Automated Ferricyanide Method para el estudio en hueso bovino	112
Tabla 19.Resultados del método 4500-Cl- E. Automated Ferricyanide Method, para el estudio en carbón mineral	114
Tabla 20.Datos utilizados en el diseño de experimentos para sulfatos con el hueso bovino	119
Tabla 21.Parámetros para determinar el coeficiente de variación para sulfatos con el hueso bovino..	119
Tabla 22.Análisis de varianza de un factor para sulfatos con el hueso bovino	120
Tabla 23.Datos utilizados en el diseño de experimentos para sulfatos con el carbón mineral	121
Tabla 24.Parámetros para determinar el coeficiente de variación	122
Tabla 25.Análisis de varianza de un factor para sulfatos con el carbón mineral	122
Tabla 26.Lecturas por patrón con su respectiva media de la turbidez (NTU)	123
Tabla 27.Lectura de turbidez de las 6 muestras	125

RESUMEN

El objetivo de este trabajo de grado consistió en desarrollar una propuesta para el tratamiento de los vertimientos provenientes de termales del municipio de Paipa, por medio de potenciales medios adsorbentes, con base en recursos naturales y residuos agropecuarios disponibles en la provincia de Tundama en el departamento de Boyacá.

Se inició con una contextualización del origen y características de las aguas termales en Colombia y en el mundo, comparando cuatro zonas geográficas diferentes, con el fin de seleccionar una guía para la campaña de muestreo realizada, seleccionándose la investigación en el VCM, puesto que proporcionaba mayor información a tener en cuenta para llevar a cabo una campaña que tenga en cuenta los parámetros más representativos.

Mediante la campaña de muestreo realizada se obtuvo que los cloruros y los sulfatos estaban por encima del valor máximo permitido en un 2245,92 % y 1715,76 % respectivamente; además la DQO también sobrepasaba el límite en un 260,67% con respecto a la Resolución 0631 de 2015, clasificándolas como aguas cloruradas, sulfatadas, hipertermales y con un pH neutro ligeramente ácido.

Teniendo en cuenta lo anterior se identifican potenciales medios adsorbentes a partir de residuos agropecuarios y recursos naturales presentes en la provincia de Tundama, seleccionando el hueso bovino y el carbón mineral para la remoción de contaminantes presentes en el recurso hídrico. Posterior a esto se evalúan unidades de separación que logren la eliminación o reducción de los contaminantes que excedan los límites, mediante matrices de selección que faciliten el secuenciamiento con la mayor eficiencia, como resultado de estas se escoge un filtro de arena, cascarilla de arroz y aserrín, como pretratamiento y una columna de intercambio iónico como tratamiento.

Finalmente, se evalúa el potencial de adsorción del hueso de bovino y el carbón mineral a escala laboratorio, donde la mejor remoción es para sulfatos con un porcentaje de 84,43% y para cloruros de 20,81% respectivamente. Generando una propuesta donde se incluya su implementación en la secuencia planteada.

Palabras clave: aguas termominerales, adsorción, vertimientos, sulfatos, cloruros, carbón mineral, hueso de bovino, tratamiento, pretratamiento, medio adsorbente.

INTRODUCCIÓN

Las aguas termominerales se originan por la circulación de aguas subterráneas a distintas profundidades donde varía la temperatura, entrando en contacto con las capas internas de la Tierra que contienen elementos minerales los cuales nutren al agua y por efecto de movimientos conectivos emanan en forma de vapor o agua caliente hacia zonas porosas y permeables [1]. Las características de estas son específicas de acuerdo a la ubicación y todos los factores que allí intervienen.

En los últimos años, el aprovechamiento de aguas termo minerales en el país ha girado en torno al gran potencial de actividades como el turismo, bajo opciones de balneoterapia y estética [2], por lo cual la implementación de centros recreacionales y hoteleros generan un incremento en el sector económico y turístico, como es el caso del municipio de Paipa, conocido por sus piscinas de aguas termales caracterizadas por sus propiedades terapéuticas y demás beneficios que pueden llegar a tener en la salud de las personas.

Donde se encuentran diferentes termales turísticos como, Hacienda el Salitre, termales El Delfín, termales Salpa, termales Pozo Azul y el Instituto de Turismo de Paipa (ITP), entre otros. El ITP, es uno de los centros recreacionales más conocidos y concurridos por el uso de aguas termominerales ya que cuenta con tres piscinas las cuales son alimentadas del llamado Pozo Azul, estas son vaciadas cada tres días a unas dársenas mediante un ducto de salida (canal de Vargas) y al cumplir su volumen máximo son vertidas al río Chicamocha, incumpliendo con los estándares requeridos por la entidad Corpoboyacá [3].

Consecuencia de esto se genera una alteración negativa en las propiedades del recurso de agua dulce representados por algunos parámetros como altos contenidos de iones Cl^- y SO_4^{2-} , Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendidos Totales (SST) y Sólidos Sedimentables (SSED); produciendo afectaciones en el ecosistema por diversas causas como el aumento de la temperatura del efluente, sobresaturación de sales, entre otras; generando que estas aguas no sean aptas para el consumo humano, ni animal, y a su vez la agricultura alrededor de la zona se ve perjudicada, teniendo en cuenta que el efluente hídrico suele ser utilizado para el riego de los cultivos de los campesinos proporcionado por USOCHICAMOCHA, entidad que tiene por “objeto principal la prestación de los servicios de Riego y Drenaje, así como también los servicios relacionados con el sector agropecuario y agroindustrial.”[4].

La elevada cantidad de cloruros presentes en los vertimientos de las piscinas termales, causa diferentes impactos en el medio donde se encuentra, entre ellos está el aumento significativo de la liberación de carbón inorgánico y orgánico disuelto de los sedimentos, ocasionando un impacto negativo en la biota acuática [5], a su vez el aumento desmesurado de este parámetro puede convertir el recurso en residuo.

En cuanto a las afectaciones que puede generar el incremento desmesurado de la concentración del ion sulfato en las aguas se identifican diferentes problemas ambientales, como la mineralización del agua, la corrosión de los metales, aparición de incrustaciones en tuberías y equipos, liberación de sulfuro de hidrógeno tóxico y la alteración del equilibrio del ciclo natural del azufre. Además de esto, se reporta que concentraciones mayores a 600 mg $\text{SO}_4^{2-}/\text{L}$ en el agua puede causar en los mamíferos efectos laxantes [6].

Por esto, se lleva a cabo una revisión bibliográfica donde se realizaron análisis fisicoquímicos sobre los vertimientos dirigidos al río Chicamocha para diferentes parámetros predeterminados por distintos autores. Se observa que las concentraciones de iones cloruro y sulfato de estas aguas termales son los factores que presentan los porcentajes más elevados con un valor de 2245,92% y 1715,76% respectivamente en relación al límite normativo, por lo que se propone un tratamiento a partir del aprovechamiento de recursos naturales y residuos agropecuarios, de los cuales algunos provocan efectos perjudiciales en el medio ambiente debido a que su acumulación origina la degradación y contaminación del suelo [7].

Ubicados en la provincia de Tundama de la cual Paipa hace parte, puesto que Boyacá se considera como uno de los departamentos con mayor actividad agropecuaria con respecto a la cantidad de hectáreas disponibles [8], de igual manera con una representación considerable del sector minero, donde el carbón representa el 41%, en Paipa [9].

Según la normativa que se rige en el país, la Resolución 0631 del 17 de marzo del 2015, del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), dictamina los parámetros y valores límites permisibles que deben cumplir los vertimientos dirigidos a aguas dulces. Resaltando que esta normativa de vertimientos reglamenta “el artículo 28 del Decreto 3930 de 2010 y actualiza el Decreto 1594 de 1984 (vigente desde hace 30 años) respondiendo a la nueva realidad urbana, industrial y ambiental del país.” [10]. Por lo cual, es de oportuna pertinencia empezar a ejecutar acciones que mitiguen este impacto puesto que las normas se actualizan, modificando los límites

de los parámetros en consecuencia al cambio en los ecosistemas producto de actividades humanas e industriales, es decir, cada vez serán más restrictivas ajustando los límites de los parámetros solicitados, por lo que se considera pertinente actuar de manera rápida.

El documento incluye la descripción de cuatro capítulos. El primer capítulo, se lleva a cabo una contextualización de todos los términos fundamentales que soporten el proyecto de grado con referencia a la contaminación en aguas por descargas provenientes de institutos termales. El segundo capítulo, describe la zona donde se presenta la problemática, características específicas de las aguas termominerales de Instituto de Turismo de Paipa, acompañado de una campaña de muestreo para obtener resultados actuales, comparándolas con campañas realizadas en años anteriores.

En el tercer capítulo, se seleccionan los potenciales medios adsorbentes con base en recursos naturales y residuos agropecuarios en Tundama, teniendo en cuenta las principales actividades agroindustriales de la región. Finalmente, en el cuarto capítulo, se elaboran y analizan matrices de selección para las dos fases de tratamiento planteadas para aguas termominerales provenientes de institutos termales. Además, se evalúa la eficiencia de adsorción de iones (cloruros y sulfatos) de los dos medios no convencionales seleccionados a nivel laboratorio para posible escalamiento. Realizando una propuesta de un secuenciamiento de unidades de separación donde se incluyen el hueso bovino y el carbón mineral como posible tratamiento previo a la última unidad de separación.

OBJETIVOS

Objetivo general

Desarrollar una propuesta de tratamiento de vertimientos provenientes de termales del municipio de Paipa, a través de potenciales medios adsorbentes generados con base en recursos naturales y residuos agropecuarios disponibles en la provincia de Tundama en el departamento de Boyacá.

Objetivos específicos

1. Caracterizar las propiedades de las aguas vertidas provenientes de piscinas termales del Instituto de Turismo de Paipa (ITP).
2. Identificar los recursos naturales y residuos agropecuarios con potencial de utilización como medio adsorbente para tratamiento de vertimientos.
3. Establecer un secuenciamiento de unidades de separación para el tratamiento de los vertimientos de las aguas termales según la caracterización realizada.

1. CONTEXTUALIZACIÓN ACERCA DE LA CONTAMINACIÓN EN AGUAS POR DESCARGAS PROVENIENTES DE INSTITUTOS TERMALES

Las aguas minerales son aquellas que emanan a la superficie consecuencia de mecanismos de surgencia que se presentan en las fisuras y fracturas existentes en las rocas [1], con una temperatura de 5°C más alta a la media anual de la superficie donde se encuentran [11], normalmente son infiltraciones de agua lluvia donde su temperatura depende del gradiente geotérmico que se alcanza según la profundidad, la mineralización no solamente se atribuye por la composición del terreno o roca en la que se ubica, sino de las aguas nacidas en las profundidades, emanadas de los magmas o liberadas por el metamorfismo de más alto grado.

1.1. Aguas termales

Estas aguas comúnmente son usadas como mineromedicinales debido a los minerales presentes y el elevado número de elementos químicos, trayendo consigo beneficios a la salud [3]. Las aguas con más de 1g/L de sustancias mineralizantes se clasifican en:

1.1.1. *Cloruradas*

Predomina el ion cloruro con concentraciones superiores al 20% meq/L, suele estar acompañado de sodio en proporción semejante [12]. Están indicadas en afecciones dermatológicas, aumentando las defensas de la piel. También tienen efecto antiinflamatorio [11].

1.1.2. *Sulfatadas*

Predomina el anión sulfato con concentraciones superiores al 20% meq/L, están influidas fuertemente en sus propiedades terapéuticas por otros iones como sodio, magnesio, bicarbonato y cloruro [12].

1.1.3. *Bicarbonatadas*

Predomina el ion bicarbonato con concentraciones superiores al 20% meq/L, pueden compartir su composición con otro tipo minerales como sodio, calcio, sulfato, cloruro. Actúan sobre el metabolismo y también tiene funciones diuréticas [12]

1.1.4. *Mixtas con relación a los aniones*

Con más de un ion (cloruro, sulfato o bicarbonato) que posee más de 20% meq/L [12].

1.2.Tratamiento de aguas

Son una serie de operaciones ya sean físicos, químicos, fisicoquímicos o biológicos, cuyo objetivo es la eliminación y/o reducción de la contaminación o de las características no deseables de las aguas [13].

1.2.1. *Tratamiento primario*

Es conocido también como tratamiento mecánico, busca la reducción de los sólidos en suspensión de las aguas residuales, haciendo sedimentar los materiales suspendidos con tratamientos físicos o físico/químicos [14].

1.2.2. *Tratamiento secundario*

Se refieren a los procesos de tratamiento biológico de las aguas residuales, los tratamientos secundarios más comunes en análisis físico-químicos son la coagulación, oxidación de las materias, decantación, arrastre de bacterias [14].

1.2.3. *Tratamiento terciario*

También conocido como tratamiento avanzado, son procesos destinados a conseguir una calidad del efluente superior a la del tratamiento secundario convencional, suele emplearse para eliminar fosfatos, sólidos en suspensión, reducir DBO, sólidos disueltos, entre otros componentes. Los tratamientos más comunes son la adsorción con carbón activado, intercambio iónico, ósmosis inversa, entre otros [14].

1.3. Adsorción (adsorbato y adsorbente)

1.3.1. Adsorción física

“También llamado fisisorción se produce si el adsorbato y la superficie del adsorbente interactúan sólo por medio de fuerzas de Van der Waals, las moléculas adsorbidas están ligadas débilmente a la superficie y los calores de adsorción son bajos” [15].

1.3.1. i. Carbón activado

Este es un material microcristalino que proviene de la descomposición térmica de madera, cortezas vegetales, carbón, etc. [15]. Poseen una alta superficie interna y una buena distribución de poros la cual permite una buena adsorción, suelen prepararse a partir de procesos físicos o químicos, y son utilizados generalmente en procesos de descontaminación de aguas, control de emisiones, eliminación de olores entre otros. [16].

1.3.1. ii. Cascarilla de arroz

Es uno de los mayores desechos agrícolas en Colombia, la cual podría ser utilizada como adsorbentes de bajo costo para varios tipos de contaminantes presentes en aguas y gases, logrando en su uso un avance en el desarrollo de tecnologías limpias y económicas en la producción de arroz.

1.4. Parámetros

El agua se clasifica de acuerdo a su composición fisicoquímica y biológica por medio de diferentes parámetros como:

1.4.1. *Temperatura*

Es un parámetro muy importante ya que determina el comportamiento microbiológico y demás componentes físicos presentes en el agua como lo son la conductividad eléctrica, el pH y OD. [17].

1.4.2. *pH*

Es el potencial de hidrógeno el cual nos ayuda a medir al grado de alcalinidad o acidez de una disolución, siendo de 14 el valor más alcalino, el 1 el valor más ácido y el 7 el valor neutro, se ha demostrado mediante estudios que las aguas tanto sulfatadas como bicarbonatadas con temperatura de 10 a 70°C tienen valor de pH entre 4.6 y 8.2, de igual forma para las aguas cloruradas profundas con contenidos de cloruros hasta de 6.800 mg/l donde su temperatura llega hasta un 70°C se pH se considera \pm neutra. [18].

1.4.3. Conductividad

Es una medida de la capacidad de la misma de transportar la corriente eléctrica [19]. Está relacionada con la presencia de sales en solución cuya disociación genera cationes y aniones capaces de transformar energía eléctrica. Refleja condiciones de mineralización. [20]

1.4.4. Sólidos suspendidos totales

Hacen referencia al material particulado que se mantiene en suspensión en las corrientes de agua superficial y/o residual [21]. La presencia de este parámetro indica un cambio en el estado de las condiciones hidrológicas de la corriente, que puede estar relacionada con procesos erosivos, vertimientos y disposición de residuos. [20].

1.4.5. Sólidos Sedimentables

Son partículas más densas que el agua, tienen la capacidad de flotar o decantar con el agua en reposo, la eliminación de este tipo de sólidos se puede hacer mediante procesos físicos o mecánicos. [22].

1.4.6. Iones cloruro

Es uno de los aniones inorgánicos principales en el agua, su contenido procede de fuentes naturales, aguas residuales y vertidos industriales [23]. La presencia elevada de este puede ocasionar corrosión, dañar estructuras metálicas y afectaciones en el crecimiento de las plantas y no apta para el consumo humano por encima de 250 mg CL- /L. [17].

1.4.7. Iones sulfato

Este ion es abundante en las aguas naturales y los niveles elevados en las aguas lluvias y superficiales pueden aportar información de ácido sulfúrico proveniente del dióxido de azufre presente en la atmósfera consecuencia de la contaminación. Al unirse con otros iones tiene propiedades incrustantes afectando tuberías y al mismo tiempo en altas concentraciones se considera tóxico para el ser humano. [24].

1.4.8. DBO

Es la cantidad de oxígeno que los microorganismos consumen durante la degradación de las sustancias orgánicas contenidas en el agua. Debido a que el proceso de descomposición varía

según la temperatura, se realiza un análisis estándar durante 5 días a 20 °C, denominado DBO₅. [25].

1.4.9. DQO

“Indica la presencia de sustancias químicas susceptibles de ser oxidadas a condiciones fuertemente ácidas y alta temperatura, como la materia orgánica, ya sea biodegradable o no, y la materia inorgánica”. [25].

1.4.10. Oxígeno Disuelto

Es la cantidad de oxígeno que está disuelta en el agua, este parámetro tiene el papel biológico fundamental de definir la presencia o ausencia potencial de especies acuáticas. [12].

1.4.11. Tratamientos de aguas

Existen diferentes tipos de tratamientos que permiten remover los contaminantes de las aguas residuales, los cuales son:

- **Tratamientos físicos:** su objetivo es eliminar partículas sólidas en suspensión que acompañan al agua, así como aceites, grasas y materia orgánica [26]. Haciendo uso como por ejemplo del método de filtración [27].
- **Tratamientos químicos:** es aquel tratamiento realizado para la eliminación de sustancias nocivas y bacterias de las aguas sin tratar [28]. Estos tratamientos pueden ser la coagulación, la cloración o el tratamiento con ozono [27].
- **Tratamientos fisicoquímicos:** se realiza mediante la adición de ciertos productos químicos, la alteración del estado físico de estas sustancias que permanecerían por tiempo indefinido de forma estable para convertirlas en partículas susceptibles de separación [29].
- **Tratamientos biológicos:** este tipo de tratamiento suele tener mayor rendimiento con un menor costo económico de explotación y mantenimiento, y destruyen completamente los contaminantes, transformándolos en sustancias inocuas como el dióxido de carbono, el metano, el nitrógeno molecular, y el agua [30].
- **Tratamientos enzimáticos:** es un tratamiento biológico el cual busca mejorar el efluente del agua, mediante el aporte de enzimas para reducir o eliminar la toxicidad del agua mediante la transformación de contaminantes [31].

- **Procesos de oxidaciones avanzadas (POA):** es una oxidación química en condiciones suaves de presión y temperatura hasta la mineralización completa de contaminantes, en donde el agente oxidante es una especie radicalaria denominada hidroxilo con una elevadísima capacidad oxidante y con tiempos de reacción muy cortos [32].

1.5. Normatividad aplicable

Debido a la contaminación que los vertimientos de aguas termales de las piscinas de Paipa causan al río Chicamocha, y al no tener una normativa específica de los parámetros permisibles para su descarga. La entidad Corpoboyacá se rige por la Resolución 0631 del 17 marzo del 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, la cual “Establece 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.” [33]. En la resolución se encuentran consignados todos los límites de los parámetros permisibles por el MADS, como es el caso para vertimientos de agroindustria, ganadería, minería e hidrocarburos que se clasifican como ARnD (Aguas Residuales no Domésticas). Entre los parámetros se encuentran: pH, DQO, DBO, SST, P, nitratos, sulfatos, entre otros.

Figura 1.*Resolución 0631 Art. 15 Parámetros fisicoquímicos*

PARÁMETRO	UNIDADES	VALORES LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES
Generales		
pH	Unidades de pH	6,00 a 9,00
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	150,00
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L O ₂	50,00
Sólidos Suspendidos 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
Hidrocarburos		
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
Compuestos de Fosfato		
Ortofosfatos (P-PO ₄ ³⁻)	mg/L	Análisis y Reporte
Fósforo Total (P)	mg/L	Análisis y Reporte
Compuestos de Nitrógeno		
Nitratos (N-NO ₃ ⁻)	mg/L	Análisis y Reporte
Nitritos (N-NO ₂ ⁻)	mg/L	Análisis y Reporte
Nitrógeno Amoniacal (N-NH ₃)	mg/L	Análisis y Reporte
Nitrógeno Total (N)	mg/L	Análisis y Reporte
Iones		
Cianuro Total (CN)	mg/L	0,10
Cloruros (Cl ⁻)	mg/L	250,00
Fluoruros (F ⁻)	mg/L	1,00
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	mg/L	

Nota. En la tabla se observan los parámetros y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas Tomado de Resolución 0631 de 2015 donde se establecen los parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos. [En línea] Disponible en: <https://fenavi.org/wp-content/uploads/2018/05/Resolucion-631-2015.pdf>

Figura 1.*Continuación de la Resolución 0631 Art. 15 Parámetros fisicoquímicos*

PARÁMETRO	UNIDADES	VALORES LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES
Metales y Metaloides		
Aluminio	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
Otros Parámetros para Análisis y Reporte		
Acidez Total	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte
Alcalinidad Total	mg/L CaCO ₄	Análisis y Reporte
Dureza Cálcida	mg/L CaCO ₅	Análisis y Reporte
Dureza Total	mg/L CaCO ₆	Análisis y Reporte
Color Real: Medidas de adsrbancia a las siguientes longitudes de onda: 436 nm, 525 nm y 620 nm	m-1	Análisis y Reporte

Nota. En la tabla se observan los parámetros y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas Tomado de Resolución 0631 de 2015 donde se establecen los parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos. [En línea] Disponible en: <https://fenavi.org/wp-content/uploads/2018/05/Resolucion-631-2015.pdf>

2. CARACTERIZAR LAS PROPIEDADES DE LAS AGUAS VERTIDAS PROVENIENTES DE PISCINAS TERMALES DEL INSTITUTO DE TURISMO DE PAIPA (ITP)

Las aguas termominerales en el país han logrado un crecimiento debido a la variedad de opciones que esta ofrece como lo son la balneoterapia y la estética, el municipio de Paipa ubicado en la provincia de Tundama del departamento de Boyacá, es conocido por su gran influencia turística y recreacional debido a la presencia de aguas termales, que de acuerdo a sus propiedades fisicoquímicas se clasifican como alcalinas, sulfatadas, cloruradas y bicarbonatadas [34]. Es por esto que se presentan diversidad de termales en la zona, más de 10 hoteles que ofrecen el servicio por medio de piscinas termales, los cuales buscan cumplir con las necesidades de los turistas en cuanto a los beneficios terapéuticos que estos proporcionan.

Uno de los institutos más visitados es el Instituto de Turismo de Paipa (ITP), el cual ofrece diferentes servicios, como el parque acuático compuesto de tres piscinas termales (Olímpica, Panorámica y Cisnes), un centro de hidroterapia, centro biomédico y SPA termal, donde el Pozo Azul es el lugar de donde se suministra todas las aguas termominerales al Instituto. Al terminar con uso de las aguas éstas son dirigidas al Canal de Vargas sin previo tratamiento, afectando el medio que lo rodea por la gran carga de contaminantes que contiene como cloruros, sulfatos, DQO, coliformes totales, entre otros [35].

Por lo tanto, a partir del año 2016 se declaró una emergencia sanitaria consecuencia de las descargas de las aguas saladas de los termales de Paipa, junto con las aguas residuales de las demás actividades hoteleras del sector al lago Sochagota y posteriormente al río Chicamocha sin tratamiento previo [36]. Provocando que se convierta en un problema socio-económico producto del incumplimiento a las normas de vertimientos, vigiladas por entidades gubernamentales como Corpoboyacá y las afectaciones ambientales que esto acarrea.

2.1. Contextualización sobre el origen y características de las aguas termales en Colombia y en el mundo

Es pertinente realizar una descripción de las aguas termominerales en Colombia y en el mundo de acuerdo al origen y características ya que estas varían de acuerdo a la ubicación y todos los demás factores que intervienen.

En Colombia, se identifica la evaluación estructural y geoquímica de las aguas termales del Volcán Cerro Machín (VCM) ubicado en el flanco occidental de la Cordillera Central de Colombia en el departamento del Tolima (Figura 4), considerado como un gran potencial para la producción de energía geotérmica relacionado principalmente con sistemas de volcanes ubicados en la zona Andina y más aún porque están cerca de ciudades importantes.

Para obtener un análisis hidrogeoquímico, se analizan muestras de agua recolectada en 2011, consignadas en el Inventario Nacional de Manifestaciones Hidrotermales (2020), donde identifican diferentes parámetros como el pH, la temperatura, el error de balance de carga y los componentes químicos que caracterizan las aguas del VCM. Por medio del análisis de iones mayoritarios se determinó que el principal catión y anión es el Na^+ y el HCO_3^- respectivamente, además los resultados de pH son ligeramente ácidos y neutros dentro de un rango de 6,27 y 7,32.

El diagrama de Piper, clasificó y agrupó las aguas termales en dos conjuntos principales: aguas bicarbonatadas de sodio (Na-HCO_3) con temperaturas altas ($57\text{ }^\circ\text{C}$ a $90\text{ }^\circ\text{C}$) y bicarbonatadas de calcio (Ca-HCO_3) con temperaturas más bajas ($42\text{ }^\circ\text{C}$ y $49\text{ }^\circ\text{C}$). Mientras que, el diagrama triangular de Na-K-Mg propuesto por Giggenbach permitió identificar el equilibrio físico químico entre el fluido y la roca huésped, para estimar la temperatura del depósito con una tendencia de $220\text{ }^\circ\text{C}$ a $230\text{ }^\circ\text{C}$.

Por lo tanto, las aguas son de origen meteórico. Las aguas Na-HCO_3 están relacionadas con un flujo ascendente directo por la intersección de una falla que es un área críticamente estresada donde se produce la interacción entre el agua y la roca, en cambio las aguas Ca-HCO_3 se convierten en fluidos geotérmicos por procesos como la condensación, la mezcla, la interacción agua-roca y el intercambio de isótopos de oxígeno con CO_2 [37].

Figura 2.

Ubicación del volcán Cerro Machín



Nota. La figura representa la ubicación geográfica del volcán Cerro Machín, en el corregimiento de Toche en el departamento del Tolima. Coordenadas 4° 29'03" N 75°23'29" W 2.589 m. Google. (s. f). [Indicaciones de Google Maps para observar la ubicación del volcán Cerro Machín]. [En línea]. Disponible: <https://n9.cl/k0th4> [Acceso: marzo 13,2022]

Un segundo punto de referencia dentro del territorio colombiano son las aguas termales ubicadas en los municipios de Becerril (Cesar) y Ciénaga (Magdalena), el propósito del estudio es determinar el origen, composición mineralógica y posibles beneficios. El área investigada se comprendió en los municipios de Becerril, situado al noreste del departamento del Cesar y Ciénaga, ubicado al nororiente de la Ciénaga Grande de Santa Marta (Figura 3), con una distancia entre ellos de aproximadamente 179,13 km. Para realizar esta investigación se tomaron tres muestras, dos en Ciénaga y una en Becerril, las cuales fueron evaluadas en el laboratorio químico de consultas industriales de la UIS.

De acuerdo a los análisis realizados, las aguas de Ciénaga se caracterizan por ser cloruradas, con elevadas concentraciones de sulfuros, donde predominan: el anión Cl^- y los cationes como el Na, Ca o Mg. En cuanto a las aguas de Becerril, estas son sulfuradas y al igual que las de Ciénaga con altas concentraciones de cloruros, además contienen más de 1 mg/L de azufre bivalente, de ordinario en forma de ácido sulfhídrico (H_2S) y ácidos polisulfhídricos, quienes le otorgan el olor característico a “huevo podrido o en descomposición”.

Las aguas de los dos municipios son de origen geotérmico o telúrico. Los procesos como la infiltración de las aguas lluvias y el cauce del río, permiten clasificar a las aguas de Ciénaga como hipertermales con un rango entre 45 °C y 100 °C, puesto que estas aguas filtradas se

encuentran en una zona de mezcla (falla de Bucaramanga en Santa Marta), allí aumentan su temperatura debido las fricciones y los constantes movimientos que se registran en la zona, además de mezclarse con las aguas endógenas producto del proceso volcánico que existió a nivel superficial de la Sierra Nevada de Santa Marta.

De la misma manera se clasifican las aguas de Becerril como hipotermales con un rango entre 20 °C y 35 °C, la diferencia en la temperatura radica en la ubicación puesto que el depósito aflora a las orillas del río Maracas, y al no encontrarse en una zona de mezcla, ni con aguas de tipo endógeno [38].

Figura 3.

Ubicación de la Serranía de Perijá y de la Ciénaga Grande de Santa Marta.



Nota. La figura representa la ubicación geográfica de los dos municipios estudiados. En la parte izquierda se encuentra Becerril, del departamento del Cesar en las estribaciones de la Serranía de Perijá. Coordenadas 9°42'N 73°17'W. En la parte derecha se encuentra el municipio de Ciénaga en el departamento de Magdalena. Coordenadas 11°02' N74°15'. Google. (s. f). [Indicaciones de Google Maps para observar la ubicación de Becerril y Ciénaga]. [En línea]. Becerril disponible: <https://n9.cl/cnwfh> Ciénaga disponible: <https://n9.cl/nyox6> [Acceso: marzo 13, 2022]

El tercer punto de referencia se encuentra en el continente asiático, específicamente en los Emiratos Árabes Unidos (EAU). El área investigada se centró en dos campos geotérmicos principales de baja entalpía: el primero se encuentra en Mubazzarah-Ain Faidha (ciudad de Al-Ain) en el Emirato de Abu Dhabi (Figura 4) y el segundo es en Ain-Khatt en el Emirato de Ras Al-Khaimah (Figura 5). Este estudio se realizó con el fin de clasificar las aguas y evaluar este recurso para la producción de energía sostenible a partir de la energía geotérmica reduciendo las emisiones de CO₂.

El muestreo y análisis del agua consistió en recolectar 19 muestras de agua (una de agua de mar, dos muestras de los manantiales y 16 muestras de agua de pozos) en los EAU durante 2017. Los diferentes análisis de pH, conductividad eléctrica, entre otros, se realizaron en el laboratorio de hidrología de la Universidad de los Emiratos Árabes Unidos (Al-Ain, EAU). El

análisis de cationes se llevó a cabo mediante el instrumento de espectroscopia de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente y el de aniones se realizó por medio de titulación y cromatografía iónica.

Los resultados clasifican la química de las aguas calientes de EAU como diluidas y su composición se debe a la mezcla entre las aguas de formación y las aguas meteóricas locales. Se hace uso del diagrama de Piper para clasificar las muestras de agua según su composición química, con esto se dice que las aguas van desde el tipo Na-Cl hasta el tipo Ca-Cl. Todas las muestras recolectadas son ricas en cloruros acompañadas con más sulfatos que bicarbonatos. Esto se debe a que se produce un flujo ascendente desde el reservorio geotérmico.

El diagrama ternario de Na-K-Mg de Giggenbach permite clasificar las aguas como totalmente equilibradas parcialmente equilibradas o inmaduras en comparación con las rocas del yacimiento. Con esto, se indica que ninguna de las muestras está en completo equilibrio, es decir, son maduras. Algunas razones pueden ser que las muestras están combinadas con otras aguas o estas aguas y todo el sistema geotérmico no ha llegado al equilibrio. Además, se estimó la temperatura del yacimiento mediante geotermómetros de materiales diferentes, el que mejor estima esta variable son los geotermómetros de cationes Na-K, con una temperatura de 112 °C y 151 °C, para el campo geotérmico de Ain Khatt y para el de Mubazzarah respectivamente. Mientras que las temperaturas de descarga están dentro del rango de 32,5 °C y 49 °C [39].

Figura 4.

Ubicación de Mubazzarah-Ain Faidha en el Emirato de Abu Dhabi.



Nota. La figura representa la ubicación geográfica del campo geotérmico de Mubazzarah-Ain Faidha en el Emirato de Abu Dhabi. Coordenadas 24° 06'21" N 55°44'13" E 264 m. Google. (s. f). [Indicaciones de Google Maps para observar la ubicación del campo geotérmico de Mubazzarah-Ain Faidha]. [En línea]. Disponible: <https://n9.cl/24zry> [Acceso: Marzo 13,2022]

Figura 5.

Ubicación de Ain-Khatt en el Emirato de Ras Al-Khaimah.



Nota. La figura representa la ubicación geográfica del campo geotérmico de Ain-Khatt en el Emirato de Ras Al-Khaimah. Coordenadas 25° 37'06" N 56°00'49" E 54 m. Google. (s. f). [Indicaciones de Google Maps para observar la ubicación del campo geotérmico de Ain-Khatt]. [En línea]. Disponible: <https://n9.cl/ykp7b> [Acceso: marzo 13,2022]

2.2. Comparación de diferentes parámetros de aguas termominerales desde un contexto nacional e internacional

Para poder realizar una comparación de las características de las aguas termominerales de los diferentes puntos evaluados se realiza una tabla (Tabla 1) donde se puedan evidenciar la cantidad de iones cloruro y sulfatos, siendo los parámetros con el valor más elevado con respecto a la norma, además se consignan otros como pH y temperatura.

Tabla 1.

Comparación de cuatro parámetros de las aguas termominerales de diferentes zonas de estudio.

Sitio	T (°C)	pH	Cl ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Referencia
Instituto Termal de Paipa (ITP)	19,7 – 37,6	6,38 – 7,54	5049	8,9	[35]
Termales Volcán Cerro Machín	29 - 90	6,27 – 7,32	148,78	160,98	[37]

Aguas termales ubicadas en los Municipios de Becerril (César) y Ciénaga (Magdalena)	24,1	7,03 – 7,05	68,9 ^B 571 ^C	70,2 ^B 161,3 ^C	[38]
Aguas termales de los Emiratos Árabes Unidos	20,2 – 49,7	7,13 – 7,63	3557,52	971,72	[39]

Nota. Los superíndices B y C que se muestran en la tabla corresponden a Becerril y Ciénaga respectivamente. Además, en la tabla se evidencia la comparación de cuatro aguas de origen termal alrededor del mundo.

Con base a los datos recolectados y consignados en la Tabla 1, se toma como referencia el estudio realizado en las aguas termales provenientes del Volcán Cerro Machín, ya que este artículo analiza nueve muestras en nueve puntos diferentes alrededor del VCM, reporta los parámetros que son de interés como la temperatura, pH, concentración de cloruros y sulfatos. Describiendo de forma detallada cómo se llevó a cabo la recolección, estudio y análisis de las muestras, la cual se explica a continuación:

1. Recolección de estudios previos en el área.
2. Procesamiento de las imágenes satelitales para poder definir los detalles cuantitativos de áreas desconocidas y asimismo para minimizar la ambigüedad de la interpretación geológica.
3. Examinar las estructuras y características geológicas, además de la extracción de fallas y lineamientos.
4. Con los puntos anteriores es posible realizar un análisis de la tendencia de deslizamiento-dilatación, también con la ayuda de tres sensores de estrés.
5. Recolección de datos hidroquímicos reportados en la base de datos del Inventario Nacional de Manifestaciones Hidrotermales.
6. Caracterización de la geoquímica acuosa.
7. Determinación del pH de las muestras analizadas.
8. Los manantiales del VCM se clasificaron mediante el diagrama de Piper en dos grandes grupos: aguas bicarbonatadas de sodio y bicarbonatadas de calcio.
9. Se obtuvo el nivel relativo de concentraciones de los iones para cada grupo de aguas, tanto para cationes como para aniones.
10. Se lleva a cabo la comparación isotópica de δD y $\delta^{18}O$.

11. Evaluación de procesos de origen y subsuelo, con respecto al origen del ion HCO_3^- y la identificación de los valores isotópicos.
12. Estimación de la temperatura de los depósitos.
13. Uso del diagrama triangular Na-K-Mg propuesto por Giggenbach, fue una de las formas utilizadas para calcular la temperatura de las aguas.
14. Se utilizaron diferentes geotermómetros como el de calcedonia y cuarzo conductivo, Na-K-Ca y los Na-K de Fournier, fue la segunda técnica para determinar la temperatura de los manantiales.
15. Simulación de los manantiales geotérmicos por medio del método integrado de geotermometría multicomponente para obtener información sobre la calidad de la agrupación.
16. Recomendaciones de nuevos análisis químicos para realizar una comparación y obtención de resultados más detallados [37].

2.3. Identificación y descripción de las zonas relacionadas con los vertimientos de las aguas provenientes de las piscinas termales del ITP

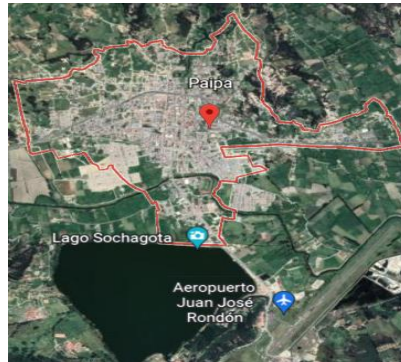
2.3.1. Paipa, Boyacá

El municipio de Paipa se encuentra ubicado en el departamento de Boyacá (Figura 6), siendo uno de los municipios más extensos de la provincia de Tundama con 305 km^2 y alrededor de 31.300 habitantes datos ofrecidos por el censo del 2018 elaborado por Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) [40].

Este municipio posee una gran variedad de sitios turísticos destacando a sus aguas termales, las cuales son conocidas por brindar beneficios terapéuticos para la salud, su clima que oscila entre los 4°C y 22°C . El sector ganadero, es uno de los factores económicos más importantes de este junto con la agricultura donde se comercializa la avena, la cebada, el trigo, la papa, las legumbres, la leche y la carne. También se destaca la explotación artesanal minera del carbón, la arena y la minería de piedra [41].

Figura 6.

Mapa Municipio Paipa



Nota. La figura representa el municipio de Paipa en el departamento de Boyacá. Coordenadas de 5°46'48" N 73° 06'53" 2.519m de Google. (s. f). [Indicaciones de Google Maps para observar la ubicación del río Chicamocha]. [En línea]. Disponible: <https://n9.cl/ojlti> [Acceso: Marzo 08,2022]

2.3.3. Provincia de Tundama

El departamento de Boyacá lo constituyen 15 provincias entre ellas se encuentra Tundama (Figura 7), la cual se compone de nueve municipios los cuales son Tutazá, Belén, Cerinza, Santa rosa de Viterbo, Floresta, Busbanzá, Corrales, Paipa y su capital, Duitama, donde la principal actividad económica es la industria, donde se destacan actividades como la transformación de alimentos, bebidas, muebles, entre otros [42].

Figura 7.

Mapa Provincia de Tundama



Nota. Se observa la provincia de Tundama con sus nueve municipios, la cual está ubicada en el departamento de Boyacá [En línea] http://www.boyacacultural.com/index.php?option=com_content&view=article&id=108&Itemid=

2.3.4. Río Chicamocha

Su punto de origen se encuentra en el departamento de Boyacá desencadenando por varios departamentos de la región, es considerado uno de los ríos más importantes debido al amplio recorrido que hace pasando por Motavita, Tunja, Oicata, Cóbbita, Sotaquirá, Paipa, Tuta, Siachoque, Duitama, Nobsa, Sogamoso, Tópaga, Monguít, entre otros [43]. Uniéndose de igual forma a otros ríos tales como el río Suarez y el río Fonce para conformar finalmente el río Sogamoso [44].

Debido a su amplio recorrido este río ha sido vital para el riego y cultivo de los sectores agrícolas del departamento de Boyacá, pero al paso del tiempo se resalta una alta contaminación en el río, dividida en dos factores principales: el primero está dado por la sobreexplotación del recurso termal y el vertimiento de las aguas al río Chicamocha, y el segundo es debido al aumento de la actividad turística lo que ha incrementado los puntos de turismo ricos en aguas termales, ayudando a la sobreexplotación de este, aumentando la migración de especies, formando cambios en las salinidades de los suelos y la contaminación acuática dada por estas actividades [35].

Logrando así generar diferentes actividades económicas en su entorno, en donde un 65% está representado en el uso agrícola el cual se reparte para riego de cultivos y pastos destinados a la producción pecuaria, por otro lado, tiene un 25% destinado al uso doméstico, un 8,6% en usos industriales y el 0,80% usos recreativos y de piscicultura [45].

2.4. Actividades industriales de algunos sectores dentro de la provincia de Tundama

Es importante tener en cuenta algunas de las actividades del sector pecuario, agroindustrial y minero de la provincia de Tundama para identificar los principales productos agrícolas, formas de empleo y fuentes de ingresos.

Paipa

Actividades del sector pecuario: Paipa posee una gran variedad de especies bovinas de las cuales según un censo realizado por el fondo nacional del ganado FEDEGAN existen casi 17.895 especies bovinas en donde abarcan un 88% la población pecuaria, seguida de los caprinos los cuales están conformados de un 9,1% [46].

Floresta

Actividades del sector agrícola: muchas de las veredas ubicadas en la parte alta del municipio cultiva en mayor escala la papa, maíz, arveja, trigo cebada, frutales como durazno, curuba, fresas, uchuva, mora, feijoa y flores como astromelias y rosas [46]. Aunque en las zonas de valle se priorizan las hortalizas algunas de estas son la zanahoria, lechuga, cebolla entre otras.

Belén

Actividades del sector agropecuario: se identifica que más o menos el 40,29% del territorio se desarrollan actividades de campo, las parcelas dedicadas para cultivar y cuidar ganado en sistemas mixtos de producción corresponden a 7.231,10 Has (63,11%), para agricultura 429,16 Has (3,75%) y, para ganadería 3.797,85 Has (33,15%) [46].

Actividades del sector ganadero: se considera como uno de las principales fuentes de ingreso, por su comercialización y producción tecnificada, el fuerte de comercialización está en los bovinos, ovinos, también se presenta la actividad piscícola la cual ha venido en aumento en los últimos años [46].

Actividades del sector minero: Se basa en la extracción en su mayoría de materiales de construcción como lo es el recebo y la caliza, buscando satisfacer la demanda interna de sus habitantes, en estas explotaciones son identificables en el caso de la arena y otros productos para la construcción [46].

2.5. Descripción de la campaña de muestreo realizada en el Instituto de Turismo de Paipa.

Para realizar la campaña de muestreo en el ITP, se tuvieron en cuenta los antecedentes acerca de dos trabajos de grado realizados para disminuir la concentración de los iones cloruros y sulfatos presentes en las aguas termales, y su posterior vertimiento sin previo tratamiento al río Chicamocha. A continuación, se va a explicar de manera resumida la recolección de las muestras, los lugares específicos y las consideraciones necesarias para realizar las respectivas campañas y luego los análisis de las muestras.

2.5.1 Campaña de muestreo evidenciada en Fase I

Según el trabajo de grado, “Propuesta para la disminución de contaminantes en las aguas residuales provenientes de las piscinas termales del Instituto de Turismo de Paipa.” Se realizó una recolecta de cuatro muestras en el ITP en botellas de 600 ml previamente purgadas con agua tratada, donde una de estas eran provenientes del Pozo Azul a una temperatura de 74°C, dos de estas fueron tomadas de la columna de intercambio iónico y la cuarta de la piscina Olímpica sin tratar. Fueron analizadas en el laboratorio “Analizar Ltda” ubicado en la ciudad de Duitama a 20 minutos de Paipa [3].

Se midió el porcentaje de iones cloruros y sulfatos tanto del agua del Pozo Azul, como de la piscina Olímpica antes de pasarla por la columna piloto, los valores iniciales para la piscina Olímpica de cloruros era de 5603 (mg Cl^-/L) y de sulfatos de 25251 (mg $\text{SO}_4^{2-}/\text{L}$) después de haber realizado el procedimiento del tratamiento planteado. Se evaluó la disminución en dos tiempo de retención (0 y 15 minutos) de estos parámetros dando como resultado en cloruros un valor para el tiempo de 0 minutos de 1953 (mg Cl^-/L) y para sulfatos de 19616 (mg $\text{SO}_4^{2-}/\text{L}$), mientras que para el tiempo de 15 minutos los resultados obtenidos para fueron de 4791 (mg Cl^-/L) y 19806 (mg $\text{SO}_4^{2-}/\text{L}$) respectivamente, demostrando una viabilidad de las resinas como tratamiento para la disminución de cloruros y sulfatos en las aguas, de igual forma se recalca la importancia de las variables de interés como lo es el tiempo de retención y pH, los tiempo de activación de la resina y su regeneración, ya que para una escala a nivel industrial estos parámetros son de gran importancia [3].

2.5.2. Campaña de muestreo evidenciada en Fase II

Respecto a la fase II “Alternativa de tratamiento de aguas provenientes de piscinas termales de Paipa para el posterior vertimiento en el río Chicamocha”. Se realizó una campaña con el objetivo de evaluar el estado de las aguas de las piscinas termales de Paipa, este muestreo lo realizaron en botellas de 500 ml previamente purgadas y posteriormente almacenadas a temperatura de 4°C para su conservación, estas muestras fueron dirigidas al laboratorio Biopolab donde se le realizaron los respectivos análisis para 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). A diferencia de fase I, fase II dividió su muestreo en tres diferentes días en donde

tuvieron en cuenta un nuevo factor a la hora de tomar la muestra el cual fue la precipitación presentada durante cada uno de los días, debido a las constantes lluvias presentadas a lo largo de la campaña.

Para el primer día se registró una temperatura de 9 a 18°C y una precipitación de 6,5 mm, recolectando tres muestras las cuales fueron captadas desde las 14:00 hasta las 18:00 hrs en intervalos de dos horas, con una afluencia de aproximadamente 78 personas. Para el segundo día la temperatura fue de 8 a 18°C y una precipitación de 7,5 mm, este día se tomaron tres muestras las cuales fueron captadas desde las 8:00 hasta las 14:00 hrs, con intervalos cada dos horas y una afluencia de 125 personas. Para el último día se presentó 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 desde las 8:00 hasta las 18:00 hora, con intervalos cada dos horas, con una mayor afluencia que los días anteriores de 421 personas [35].

2.5.3. Campaña de muestreo Fase III

De acuerdo con lo anterior, se llevó a cabo una campaña de muestreo para evaluar las características de las aguas termales dentro del Instituto de Turismo de Paipa, teniendo en cuenta las tres piscinas del parque acuático (Panorámica, Olímpica y Cisnes), el lugar de donde emanan llamado Pozo Azul y el canal de Vargas, donde desembocan las aguas residuales provenientes de la actividad termal, con el fin de ejecutar el primer objetivo.

Para la toma de muestras fue necesario basarse en los puntos más concurridos dentro del instituto como lo son, el parque acuático, el nacimiento de las aguas termales y el canal de Vargas. El volumen captado de agua en cada uno de estos puntos fue de 200 mL, posteriormente fue almacenado a una temperatura de 4°C para mantener su conservación y disminuir el crecimiento microbiano, según el protocolo consignado en el Manual de Instrucciones para la Toma, Preservación y Transporte de Muestras de Agua de Consumo Humano para Análisis de Laboratorio del Instituto Nacional de Salud (INS) [47]. Luego fueron trasladadas al laboratorio CYANAM S.A.S, el cual cuenta con la acreditación del IDEAM bajo la resolución 1519 del 07 de diciembre del 2021, en donde para la determinación de cloruros se realizó bajo el método de argentométrico (S.M. 4500 - Cl -B) y para sulfatos bajo el método de turbidimetría (S.M. 4500-SO4 E).

El cloruro, en forma de ion Cl^- , es uno de los aniones inorgánicos principales en el agua, su contenido procede de fuentes naturales, aguas residuales y vertidos industriales. El efecto antropogénico está mayormente asociado con el ion sodio. El aumento de cloruros puede ser motivado por ciertos desechos industriales, aguas residuales domésticas, retornos de aguas de riego o bien residuos de actividades en zonas pecuarias [48].

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

Ecuación 1.

Determinación de cloruros.

$$\frac{mg\ Cl^-}{L} = \frac{[(A - B) * N * 35,45 - 1000]}{ml\ de\ muestra}$$

Nota. La presente ecuación 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

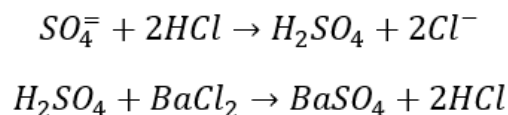
B= mL de nitrato de plata gastados en el blanco

N= normalidad del nitrato de plata

Los iones sulfato suelen encontrarse en gran variedad de aguas naturales, estos se originan gracias a la oxidación de las menas de sulfuro, residuos industriales o en contacto con componentes de esquistos [49].

La determinación de sulfatos se realizó mediante el método de turbidimetría el cual se basa en precipitar el ion en un medio ácido con cloruro de bario formando cristales de sulfato de bario, la cantidad de cristales es proporcional a la concentración de sulfatos presentes dentro de la muestra, se mide mediante espectrofotometría por medio de la absorbancia luminosa a 420 nm, determinando así la concentración de sulfatos.

Esta determinación de sulfatos se da mediante la siguiente reacción:



Este método turbidimétrico permite determinar hasta 40 mg/L de sulfatos, por lo que si la muestra presenta una mayor concentración a esta se debe realizar diluciones a la misma, para su correcta medición de igual forma se plantea un tratamiento previo a las aguas con alta turbiedad como lo son la centrifugación y la filtración [50].

Ecuación 2.

Determinación de sulfatos.

$$\frac{mgSO_4}{L} = \left(\frac{((NTUf - NTUi) - Intercepto)}{Pendiente\ de\ la\ curva} \right) * FD$$

Nota. En la presente ecuación se muestra la fórmula para calcular los mg/L de sulfatos presentes en una muestra de agua. Tomado de IDEAM. [en línea]: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Sulfato+en+agua+por+Nefelometr%C3%ADa.pdf/f65867a2-079f-420c-9067-b1c4c3139e89>

Donde:

NTUf = Turbiedad final

NTUi = Turbiedad inicial

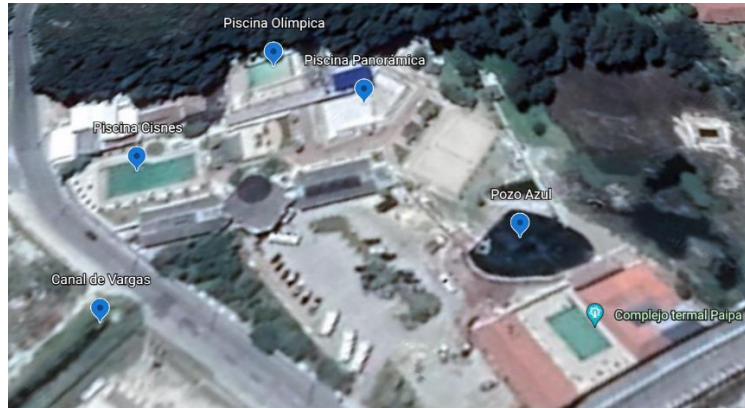
Intercepto: Intercepto con el eje de las ordenadas

FD = Factor de Dilución

Para la campaña de muestreo se averiguó con los trabajadores del ITP los puntos estratégicos para la toma de muestra los cuales se pueden identificar en la Figura 8, por lo tanto se tuvieron en cuenta las piscinas con mayor afluencia para la época, el nacimiento de las aguas termales y el canal de Vargas, de allí las aguas siguen su paso al río Chicamocha sin previo tratamiento lo que se convierte en un problema para aquellos que se abastecen y usan el agua de este recurso hídrico para diferentes actividades como riego para los cultivos, consumo animal y humano, ya que están cargadas de elevados contenidos de cloruros y sulfatos, así como también parámetros por encima de los rangos permitidos como DQO [32].

Figura 8.

Ubicación geográfica del ITP y los puntos donde se realizó la campaña de muestreo.



Nota. La figura muestra la ubicación geográfica del ITP, además los cinco puntos que se tuvieron en cuenta para realizar la campaña de muestreo indicados con marcadores. Coordenadas 5° 45'25" N 73°06'34" W 2493 m. Google. (s. f). [Indicaciones de Google Maps para observar la ubicación del Instituto de Turismo de Paipa]. [En línea]. Disponible: <https://n9.cl/0htie>

Figura 9.

Pozo Azul



Nota. La figura muestra el Pozo Azul el cual es punto de nacimiento de las aguas termales, ubicado en las instalaciones del Instituto de turismo de Paipa el cual abastece las piscinas del lugar.

Pozo azul (Figura 9), es un lugar donde brotan aguas termominerales, el recorrido de estas aguas inicia en el Alto de la Vega, el cual es un pico en el departamento de Boyacá, que tiene una altitud de 766 m, ubicado al noroeste del Cerro los Godos y al sur del Alto Hoyo Negro [51], cuando van descendiendo adquiere su característica termomineral hasta llegar al Pozo Azul donde finaliza su recorrido. Este es utilizado como fuente de abastecimiento para las piscinas del ITP, suele tener temperaturas cercanas a los 74°C [52]. Se le realiza una limpieza de algas una vez por mes, ya que su crecimiento puede ralentizar el proceso de llenado de las piscinas evitando la acumulación. Es uno de los dos pozos aprobados para el uso recreativo.

Figura 10.

Piscina Olímpica



Nota. La figura muestra la piscina olímpica, siendo una de las piscinas con mayor afluencia de gente durante la toma de muestras, ubicada en las instalaciones del Instituto de turismo de Paipa.

Figura 11.

Piscina Cisnes



Nota. La figura muestra la piscina Cisnes la cual es una de las piscinas con menor afluencia de gente durante la toma de muestras, ubicada en las instalaciones del Instituto de turismo de Paipa.

Figura 12.

Piscina Panorámica



Nota. La figura muestra la piscina Panorámica es una de las tres piscinas dentro del Instituto de Turismo de Paipa, tuvo mayor afluencia los días 14 y 15 de abril.

En las Figuras 10, 11, y 12, se pueden identificar las piscinas que se tuvieron en cuenta para realizar la campaña de muestreo, algunos rasgos a destacar de cada una de las piscinas son: la piscina Olímpica, es la que tiene mayor profundidad y el primer día de campaña (13 de abril) fue la que tuvo más afluencia de bañistas. La piscina Cisnes, es aquella que no es tan concurrida por los turistas debido a que el crecimiento de algas es mucho más rápido en comparación con las

otras dos, una causa de esto puede deberse a que es la piscina que está más expuesta al sol propiciando la proliferación de estos microorganismos.

La tercera piscina, llamada Panorámica, es la más visitada, tuvo una mayor afluencia los dos últimos días de la campaña. Como recomendación para las piscinas, debido al elevado flujo de gente diariamente, se considera un incremento en la gama de microorganismos no solo característicos de las aguas termales, sino de la cantidad de personas que tienen contacto con esta. La cual podría provocar variaciones en los resultados de algunas tomas, aunque estos no generan variación en las características fisicoquímicas del agua.

Figura 13.

Canal de Vargas



Nota. La figura muestra el canal de Vargas, el cual es el punto donde desembocan las piscinas del Instituto de Turismo de Paipa.

El canal de Vargas (Figura 13), es el punto de desembocadura de las aguas de las piscinas termales dentro de ITP, cabe destacar que el nivel del agua a comparación de años anteriores descendió de manera notoria debido a las precipitaciones reportadas para ese periodo del año, esto se puede observar en la tesis de L.D. Duarte y M. Mosquera, “Alternativa de tratamiento de aguas provenientes de piscinas termales de Paipa para el posterior vertimiento en el río Chicamocha.” Pág. 49 (2021).

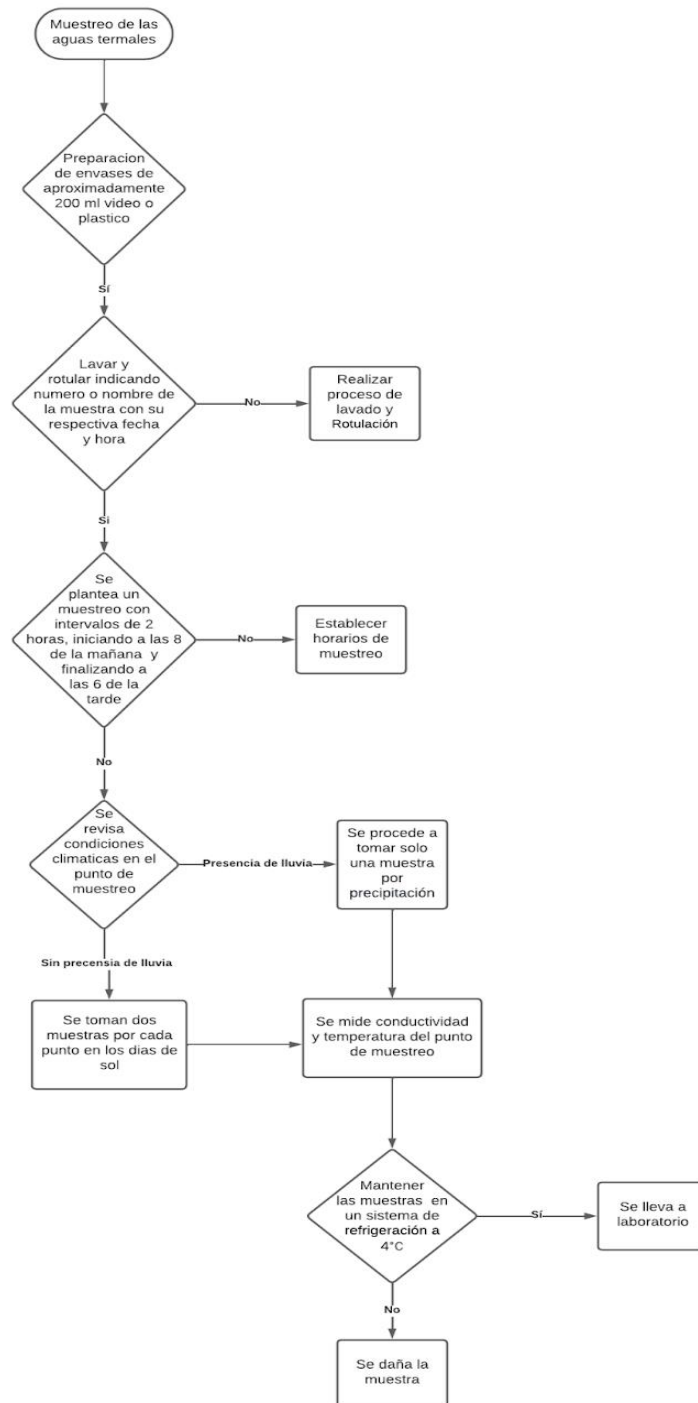
Asimismo, se puede identificar la diferencia del número de personas que visitan el ITP, teniendo en cuenta que los años 2020 y 2021 el país estaba atravesando la emergencia sanitaria a causar del COVID-19, pero desde este año el Instituto de Turismo de Paipa ha ido recuperando la afluencia de turistas, es decir, pasar en el 2021 de un rango de 78 - 421 personas, a en el 2022 obtener un rango en temporada alta de 1363 - 2287 personas, reportándose un incremento del 543, 23%, siendo un valor sumamente representativo.

En la imagen se logra observar que además del bajo flujo, hay una tubería de descarga deteriorada, posiblemente por las altas concentraciones de sales (cloruros y sulfatos) que salen junto con la corriente, puesto que son altamente corrosivos, produciendo este desgaste en la tubería.

Teniendo en cuenta los puntos en donde se hará el muestreo, se siguió un patrón de recomendaciones para la toma de muestras, el cual fue representado por medio de la Figura 14.

Figura 14.

Diagrama de flujo de la recolección de muestras de aguas termominerales.



Nota. La figura muestra el diagrama de flujo para realizar paso a paso la recolección de muestras teniendo en cuenta aspectos como el lavado, rotulación de los recipientes, precipitación, temperatura, conductividad, entre otros. Elaboración propia

Se averiguó en reportes pasados del Instituto de Turismo de Paipa (marzo,2022) los estudios microbiológicos realizados a las zonas de más uso por los visitantes.

En las aguas termo minerales debido a sus características y al contacto con diferentes zonas, personas, etc., es común el crecimiento de ciertos microorganismos que son propios en estos ambientes y que se logran adaptar a estas condiciones extremas de estos ecosistemas [53]. Poseen diversas bacterias como lo son las heterótrofas oligotróficas de los géneros: Pseudomonas, Bacillus, Micrococcus, entre otras. Posee en un menor número de microorganismos autótrofos (quimiolitotrofos y fototrofos) [54].

Debido a la afectación que estos microorganismos pueden tener sobre la salud de las personas, una entidad gubernamental exige a los sitios turísticos llevar un control acerca de los análisis microbiológicos mensualmente, estos se basan en la medición de (dermatofitos, mohos, levaduras, coliformes termotolerantes, *E. coli*, heterótrofos y pseudomona aeruginosa), que pueden estar en mayor cantidad en las aguas de interés para este proyecto de investigación debido a las características del lugar de donde brotan.

Es importante destacar que para este estudio los análisis microbiológicos no representan un parámetro significativo, puesto que los contaminantes a evaluar como los contenidos de iones cloruros y sulfatos no están directamente relacionados, pero es necesario abarcar todas las posibles características que pueden tener las muestras a analizar. El informe de resultados de los ensayos microbiológicos del ITP, se encuentran en el anexo 1. Se realizaron en un laboratorio con el objetivo de llevar a cabo un control sanitario y de calidad, realizado para el mes de marzo el día 16 del presente año.

Estos análisis deben realizarse de acuerdo al Decreto 2171 de 2009, donde se deben cumplir con los valores admisibles de la calidad del agua establecidas por el Ministerio de la Protección Social, realizando los análisis de hongos, levaduras y dermatofitos en piscinas y estructuras similares de uso colectivo [55].

Los dermatofitos son hongos filamentosos que afectan la epidermis y anejos cutáneos [56]. El método para su identificación es por medio del recuento de placa, se basa en la concentración viral, mediante el conteo de unidades formadoras de placas (UFP), las cuales se identifican como

zonas de aclaramiento circular que se producen en la capa del microorganismo [56]. De acuerdo a los resultados obtenidos, no hay presencia de dermatofitos en la mayoría de los lugares muestreados exceptuando cama de burbujas del spa termal, donde sí están presentes por lo que se deben realizar mantenimientos ya que estos pueden producir lesiones leves o intensas.

Los mohos son hongos que se pueden encontrar al aire libre, como también en espacios cerrados. Su crecimiento se ve favorecido por condiciones de temperatura entre 10-35 °C, aunque prefiere las más cálidas y por la actividad de agua relativamente baja [57]. El método de análisis de moho se realiza por medio de filtración por membrana, consiste en atrapar o retener en la superficie de una membrana microorganismos que tienen un tamaño mayor que el del poro (0,45 μm), los hongos que quedan retenidos son llevados a un medio enriquecido donde se puede evidenciar su crecimiento y por lo tanto las UFC [58].

Según los resultados solo se evidencia presencia de mohos en la rampa de entrada de la piscina Cisnes y en la cama de burbujas del spa termal, con valores de 3 y 7 UFC/cm² respectivamente los cuales no sobrepasan el valor admisible por lo que con respecto a este parámetro cumplen con la norma.

Las levaduras son un grupo de microorganismo eucariotas aerobios, su temperatura de crecimiento está dentro del rango de 5 a 37 °C, con un valor óptimo de 28 °C. La mayoría de estas crecen mejor en medios que disponen cantidades considerables de agua [59]. Si se presentan elevados indicadores de este microorganismo puede indicar problemas con la higiene, limpieza y contaminación ambiental del sitio que se esté analizando. El método de análisis al igual que el moho es por medio de filtración por membrana.

De acuerdo a los resultados presentados por el laboratorio, el único lugar de muestreo donde hay presencia de levaduras es en la cama de burbujas del spa termal con un valor de 2 UFC/cm², dato que no sobrepasa el valor admisible.

Los coliformes termotolerantes, reciben ese nombre porque soportan temperaturas de hasta 45 °C, se componen de un número reducido de microorganismos, estos son indicadores de calidad por su origen. La bacteria E. Coli, es la que se encuentra en mayor proporción [60]. El método SM 9222 J consiste en el proceso de filtración por membrana para poder detectar los microorganismos como se explicó anteriormente.

De acuerdo a los resultados obtenidos, el único lugar de los siete puntos analizados el que presenta estos microorganismos, es la zona de las escaleras de la piscina Panorámica con un valor de 3 UFC/100 cm³, superando el valor admisible. Estos pueden provenir del suelo o de superficies de agua dulce, por lo tanto, no siempre son intestinales. La presencia de estos puede ser a causa de fallas en la limpieza y tratamiento del agua [61].

La bacteria *E. coli*, es Gram negativa, anaerobia facultativa, forma parte de microbiota normal del intestino del ser humano y los animales de sangre caliente. La presencia de este en un recurso hídrico es de alerta porque puede generar gastroenteritis, además de esto pueden identificarse la presencia de otros microorganismos patógenos como la *Salmonella*, *Shigella*, *Listeria*, etc. El método de cuantificación es el mismo que el de los coliformes termotolerantes (SM 9222 J). Los resultados del laboratorio no reportaron la presencia de *E. coli* en ninguno de los puntos muestreados, es decir que se maneja un bien y continuo sistema de limpieza.

Las bacterias heterotróficas se encuentran en los cuerpos de agua y constituyen un grupo de bacterias ambientales de una gran distribución, estas al igual que las termotolerantes y la *E. Coli* permiten identificar la eficacia de los tratamientos y manejo al agua, como los de desinfección [62]. El método de análisis es llamado SM 9215 D, basado en la filtración por membrana. Los resultados obtenidos del análisis microbiológico detectó heterótrofos en la zona de la escalera profunda de la piscina Panorámica y en la zona de rampa de la piscina del centro de hidroterapia con valores de 26 y 17 UFC/100 cm³ respectivamente, estos no sobrepasan el valor consignado en la norma.

Por último, se analiza la *pseudomona aeruginosa* es una especie de bacilos rectos o ligeramente curvados, bacteria patógena Gram negativa, aerobios estrictos, se encuentran en ambientes naturales como lagos y ríos, también en suelos. Es considerada entre su género *Pseudomonas* como la más invasiva, toxigénica y produce infecciones en humanos [63]. La Norma Técnica Colombiana (NTC) 5594 del 2008, la cual tiene por objeto especificar un método que permite el aislamiento y recuento de estos microorganismos en muestras de agua, por medio de la técnica de filtración por membrana [64]. En los resultados de laboratorio no se identificó la presencia de *Pseudomonas aeruginosa*, por lo que no se consideran como peligrosas para el ser humano.

Teniendo en cuenta todos los resultados del anexo 1, se puede concluir que en general las instalaciones del ITP cumplen con casi todos los rangos exigidos por la norma, exceptuando los dermatofitos en la cama de burbujas del spa termal y los coliformes termotolerantes en la zona de escalera profunda de la piscina Panorámica. Se sugiere realizar tratamientos más rigurosos y constantes para evitar la presencia de estos microorganismos.

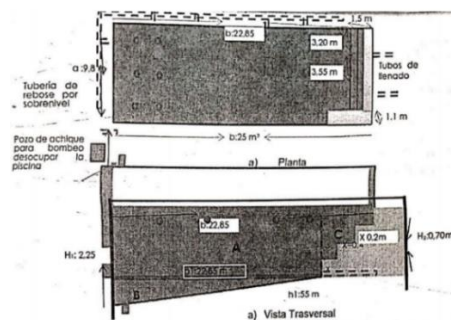
En esta campaña de muestreo se añadieron nuevas variables con respecto al sitio como lo son la georeferenciación, la radiación solar, evapotranspiración, humedad relativa, cobertura nubosa, temperatura ambiente, de la ubicación de la toma de muestra y del agua, presión, precipitación y la afluencia de turistas en el ITP. Para poder realizar una comparación a la hora de obtener los resultados de los parámetros evaluados se tuvieron en cuenta el pH, la temperatura, las concentraciones de iones sulfatos y cloruros. Las bitácoras donde se consignaron los valores de estos parámetros se encuentran en el anexo 2.

El mantenimiento de las piscinas, se realiza de la siguiente manera [35]:

- Piscina Olímpica: el llenado se realiza por gravedad (es la única que se llena de esta manera) y se desocupa por bombeo. Cada dos días en temporada alta debido a la afluencia de visitantes se limpia y se vacía casi en su totalidad para retirar algas y demás impurezas, pero esta actividad está programada normalmente los días martes y viernes. Cuenta con un volumen útil de $355,56 \text{ m}^3$ [35], las demás dimensiones se pueden apreciar en la Figura 15.

Figura 15.

Dimensiones de la piscina Olímpica

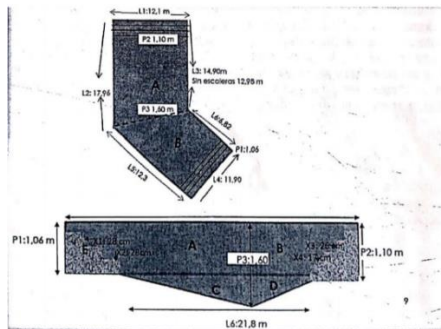


Nota. La figura muestra la vista transversal y superior de la piscina Olímpica del ITP con sus respectivas dimensiones. L. D. Duarte Sabogal y M. Mosquera Forero, “Alternativa de tratamiento de aguas provenientes de piscinas termales de Paipa para el posterior vertimiento en el río Chicamocha.” Trabajo de grado, Fundación Universidad de América, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/8662>.

- Piscina Panorámica: se llena por bombeo. El mantenimiento se realiza los días lunes y jueves, según lo programado por el ITP, pero en temporada alta las tres piscinas se vacían cada dos días, es decir, que siempre estará en mantenimiento una de ellas. El volumen útil de la piscina Panorámica es de 376,00 m³ [35], las dimensiones detalladas se encuentran en la Figura 16.

Figura 16.

Dimensiones de la piscina Panorámica

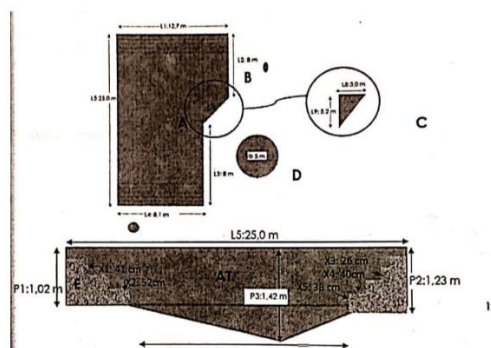


Nota. La figura muestra la vista transversal y superior de la piscina Panorámica del ITP con sus respectivas dimensiones. L. D. Duarte Sabogal y M. Mosquera Forero, “Alternativa de tratamiento de aguas provenientes de piscinas termales de Paipa para el posterior vertimiento en el río Chicamocha.” Trabajo de grado, Fundación Universidad de América, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/8662>.

- Piscina Cisnes: se llena por bombeo, se le realiza mantenimiento los días miércoles y sábados, su volumen útil es de 261,30 m³ [35], las dimensiones detalladas de la piscina se pueden visualizar en la Figura 17.

Figura 17.

Dimensiones de la piscina Cisnes



Nota. La figura muestra la vista transversal y superior de la piscina Cisnes del ITP con sus respectivas dimensiones. L. D. Duarte Sabogal y M. Mosquera Forero, “Alternativa de tratamiento de aguas provenientes de piscinas termales de Paipa para el posterior vertimiento en el río Chicamocha.” Trabajo de grado, Fundación Universidad de América, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/8662>.

- Hidroterapia: esta se llena por bombeo, alimentada por el Pozo Azul.
- Biomédica: se utiliza los fines de semana, el llenado empieza a los viernes a las 16:00 hrs y se desocupa el lunes.
- SPA: se llena por bombeo, también alimentada por el Pozo Azul, sólo funciona los fines de semana. Al igual que la piscina de la zona biomédica se inicia el llenado el viernes y se vacía el lunes o el martes si es festivo el día anterior.

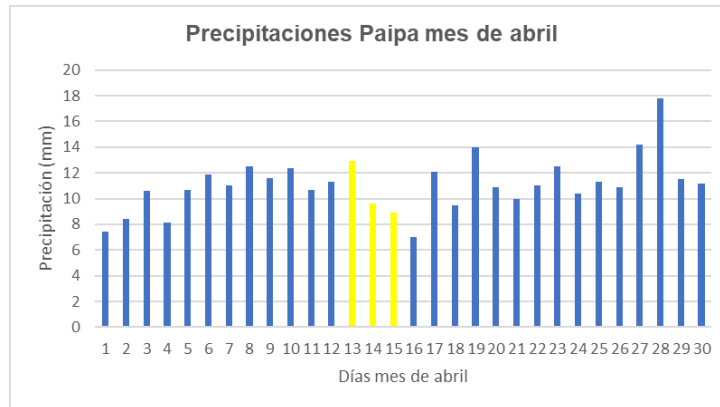
Para poder realizar el lavado de las piscinas, estas primero se deben desocupar, se les adiciona agua proveniente del acueducto de red vital. Se proporciona por medio de una manguera y se barren todas las paredes y piso para retirar las algas. Normalmente para este proceso de limpieza se utiliza agua y jabón, cuando se quiere eliminar alguna mancha se usa cloro y ocasionalmente se usa agua y ácido nítrico para el lavado más eficiente de estas [35].

El mantenimiento de las piscinas del parque acuático (Panorámica, Olímpica y Cisnes) actualmente se realiza por medio de dos lavados por semana, el cual consiste en un recambio de un porcentaje de la lámina de agua debido a la frecuencia de uso y la evaporación que se produce como proceso físico natural. Estos factores ocasionan que haya una disminución de la temperatura del agua (36 °C - 41 °C) de las tres piscinas más concurridas, con respecto a la del Pozo Azul [35].

Las precipitaciones son un factor clave en la toma de muestras, ya que se pueden mostrar diferencias significativas, debido a que los cambios de este pueden causar alteraciones tanto en las concentraciones o cantidades de distintos parámetros fisicoquímicos y biológicos, así como también variaciones en los caudales [65]. Por esto, en la Figura 18, se presentan las precipitaciones durante todo el mes de abril en el municipio de Paipa, para los tres días de muestreo se obtuvieron precipitaciones de 12,9 mm; 9,6 mm y 8,9 mm clasificándose entre ligeras y moderadas según la Tabla 2.

Figura 18.

Precipitaciones en el mes de abril en el municipio de Paipa.



Nota. La tabla muestra día a día las precipitaciones del mes de abril del 2022 en el municipio de Paipa, Boyacá. [En línea] <https://es.climate-data.org/america-del-sur/colombia/boyaca/paipa-50159/t/abril-4/>

Este factor influyó en gran medida en los resultados del trabajo de grado de las autoras L. Duarte y M. Mosquera debido a que se presentaron fuertes precipitaciones [35], pero en esta nueva campaña de muestreo realizada las lloviznas se presentaron en las mañanas antes de tomar las pruebas en cantidades mínimas y por un corto periodo de tiempo, lo que quiere decir que no hubo precipitación efectiva, la cual se define por la fracción de lluvia aprovechada por las plantas, debido a que no toda el agua proveniente de las precipitaciones llega a las raíces de las plantas por la cobertura de suelo (solo se presenta moje de suelo) y el proceso de escurrimiento [66]. En este sentido solo a cuatro de las 28 muestras recolectadas no se les realizó duplicado.

Tabla 2.

Clasificación de la precipitación promedio diaria.

Nombre	Desde (mm)	Hasta (mm)
Seco	0,0	0,5
Débil	0,6	3,0
Ligeras	3,1	10,0
Moderadas	10,1	25,0

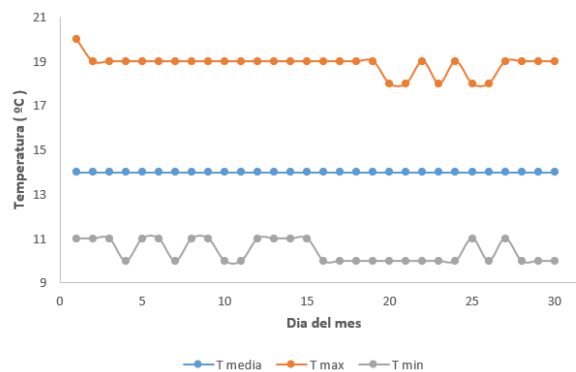
Fuertes	25,1	75,0
Extremas	75,1	300,0

Nota. La tabla muestra la clasificación de la precipitación promedio diaria según la empresa ETESA (Empresa de Transmisión Eléctrica) de Panamá. “Influencia de la variación estacional de la calidad y cantidad de agua residual en la eficiencia de tratamiento: caso de la planta de tratamiento de aguas residuales de Juan Díaz, panamá, república de panamá” (2015). Revista de Iniciación Científica. Pág. 12. Disponible en: <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/ric/article/view/445>

La temperatura es otro de los factores a tener en cuenta en la campaña de muestreo, debido a que es necesario tener un reporte de las propiedades características in situ proporcionando más solidez y veracidad al tipo de estudio. En la Figura 19, se identifica la temperatura máxima, media y mínima del mes de marzo del presente año, en marcando principalmente en amarillo los días en los que se recolectaron las muestras de agua en el ITP. Su temperatura máxima fue de 17,5 °C, la mínima de 9,7 °C y la media se mantuvo en 13 °C.

Figura 19.

Temperatura del mes de marzo 2022.



Nota. La gráfica representa la temperatura exterior en los días del mes de marzo del 2022. [En línea] Clima en Duitama en marzo 2023 - Tiempo, Temperatura y Clima en marzo (adonde-y-cuando.es)

El primer día de campaña se realizó el miércoles 13 de abril del 2022, este día solo estaban en funcionamiento la piscina Olímpica y Panorámica por lo que se procedió a tomar la muestra de la piscina Olímpica porque según los trabajadores del lugar es la más concurrida, la muestra se envasó en dos botellas de plástico de aproximadamente 200 mL para poder tener un duplicado de cada una. A las 14:17 hrs no se presentaron precipitaciones, la radiación in situ fue de 517 W/m²,

cielo nublado con una cobertura nubosa de 8 octas, humedad relativa del 54%, presión de 1005,8 mb y con temperatura ambiente y de la piscina de 22 °C y 37,9 °C respectivamente.

Como segundo punto de muestreo, a las 15:00 hrs en el Pozo Azul, lugar donde brotan las aguas termominerales, se presentó una radiación de 986 W/m², cielo parcialmente nublado con una cobertura nubosa de 8 octas, humedad relativa del 68%, con temperatura ambiente 24,1 °C y una temperatura promedio del pozo de 52,13 °C.

Por último, se realizó una tercera toma de muestra en el Canal de Vargas a las 16:10 hrs, se obtuvo una radiación del lugar de 655,36 W/m², se presentó un cielo más despejado con una cobertura nubosa de 2 octas, humedad relativa del 68%, temperatura ambiente in situ de 17,97 °C, temperatura de la desembocadura del tubo de 44,1 °C, en este punto de muestreo se agregaron dos nuevos parámetros: la profundidad del canal con un valor de 28 cm y un caudal de 0,5 L/s. La medida del caudal se dificultó debido a que el tubo donde desembocan las aguas está totalmente deteriorado como se puede apreciar en la Figura 20, por lo tanto, este valor puede tener un rango de error considerable.

Figura 20.

Tubo de salida Canal de Vargas



Nota. En la figura se observa el tubo de salida de las aguas termales del instituto de Turismo de Paipa hacia el Canal de Vargas.

Luego de realizar la primera toma de muestras en los tres puntos seleccionados se procedió a realizar el mismo ejercicio, toma de muestra en la piscina Olímpica, Pozo azul y canal de Vargas, en las siguientes horas: 17:47, 18:09 y 18:27 respectivamente, los demás datos de este muestreo se encuentran consignados en el anexo 2. En la Figura 21 se evidencian algunas de las muestras tomadas el día 13 de abril.

Figura 21.

Recolección de muestras el día 13 de abril del 2022.



Nota. En la figura se observa las tres muestras recolectadas sin el duplicado en los tres sitios diferentes, Pozo Azul, piscina Panorámica y canal de Vargas en el instituto de Turismo de Paipa.

El segundo día de campaña se realizó el día jueves 14 de abril del 2022, los lugares de muestreo seleccionados fueron el canal de Vargas y el nacimiento Pozo Azul. La recolección de muestras en el primer punto (canal de Vargas) inició a las 9:21 hrs aproximadamente, el caudal del desagüe era más abundante con un valor de 2,33 L/s, se percibió un olor más intenso a aguas sulfuradas, esto se debe a que la piscina Panorámica estaba en mantenimiento por lo que fue totalmente vaciada para la limpieza. Si se compara con el caudal del primer día de campaña se puede notar la diferencia en el aumento de esta variable.

El segundo punto para la toma de muestras (Pozo Azul) se realizó a las 9:40 hrs aproximadamente, la temperatura del lugar fue de 17,74 °C, con una humedad relativa del 56%, el cielo se encontraba despejado, sin precipitaciones y radiación de 2323 W/m², más elevada que en el canal de Vargas. La temperatura del agua fue de 52,97 °C un poco más elevada que la registrada el día 13 de abril, pero se debe tener en cuenta factores como la hora, la radiación y se pudo evidenciar que el nacimiento presentaba un mayor burbujeo.

Para la segunda toma de muestras se realizaron las mismas mediciones a las 16:22 hrs, se presentó una llovizna poco intensa por un periodo de tiempo de 30-40 min aproximadamente, por lo tanto, no se realizó el duplicado de estas muestras, en el canal de Vargas, la humedad relativa ascendió al 65% y la temperatura a la salida del tubo descendió a 39,10 °C a causa de la llovizna presentada. En el Pozo Azul, se realizó el muestreo a las 14:10 hrs, la radiación disminuyó

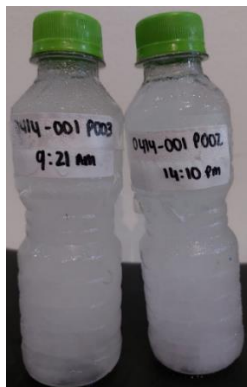
considerablemente de 2323 a 232 W/m², la temperatura no se vio afectada, pero cabe añadir que el nivel era más bajo, lo que dejaba al descubierto las algas.

La última recolección de muestras en el día, se realizó primero en el Pozo Azul a las 18:20 hrs, la temperatura in situ del ambiente y del agua del pozo fueron de 14,45 y 53,00 °C, no se presentaron variaciones con respecto a la temperatura del Pozo Azul durante el transcurso del día, parámetros como la temperatura y humedad del lugar aumentaron. Por último, a las 18:40 hrs se realizó la recolección de muestras en el canal de Vargas, con precipitación ligera al inicio, durante y al finalizar todo el procedimiento. La temperatura de la desembocadura del tubo disminuyó 1 °C con respecto a la segunda toma de datos, al igual que el caudal con un valor de 1 L/s. Finalmente, la cantidad total de personas que ingresaron al ITP fue de 1956, valor que aumentó con respecto al 13 de abril.

Los demás parámetros recolectados se encuentran consignados en el anexo 2, en la Figura 22 se pueden observar algunas de las muestras recolectadas el día jueves 14 de abril.

Figura 22.

Recolección de muestras el día 14 de abril del 2022.



Nota. En la figura se observa las tres muestras recolectadas sin el duplicado en los dos lugares de muestreo seleccionados, Pozo Azul y canal de Vargas en el instituto de Turismo de Paipa.

El último día de campaña se realizó el día 15 de abril del 2020, los lugares de muestreo seleccionados fueron dos: la piscina Panorámica y el canal de Vargas. La primera recolección de muestras inició en la piscina Panorámica a las 10:00 hrs, la temperatura del ambiente fue de 18,58 °C y una humedad relativa del 58%. La temperatura promedio del agua fue de 40,33 °C, valor que es mayor al de registrado el 13 de abril en la piscina Olímpica, se debe tener en cuenta que la

Panorámica cuenta con un chorro el cual es activado cada cierto periodo de tiempo, este proviene directamente del Pozo Azul lugar donde la temperatura es más alta.

El segundo punto fue el canal de Vargas, la medición inició a las 10:30 hrs, la temperatura del agua fue de 43,20 °C, algunas anotaciones importantes: se presentó un menor flujo de agua en comparación con el día anterior (14 de abril), con un caudal de 2 L/s, nivel del agua de aproximadamente 26 cm, además el olor a aguas sulfuradas incrementó. La segunda recolección de muestras se hizo en la piscina Panorámica a las 14:00 hrs, la temperatura aumentó a 19,66 °C y la de la piscina se mantuvo dentro del rango con un valor de 39,73 °C.

A las 14:30 hrs, se realizó la última recolección de muestras en el canal de Vargas, la temperatura y humedad relativa in situ fue de 18,80 °C y 62% respectivamente. La temperatura a la salida del tubo fue de 39,8 °C, disminuyendo 2 °C aproximadamente, con un caudal de 2,3 L/s. A todas las muestras se les realizó duplicado ya que no se presentaron precipitaciones durante la medición. Este día la cantidad de gente que ingresó al ITP fue mucho mayor relacionado con los dos días anteriores, ingresaron un total de 2287 personas esto se debe a que fueron días festivos de la semana santa.

Los demás valores consignados se encuentran en el anexo 2, en la Figura 23 se muestran algunas de las muestras recolectadas para posteriormente llevar a cabo los respectivos análisis.

Figura 23.

Recolección de muestras el día 15 de abril del 2022.



Nota. En la figura se observa las muestras recolectadas sin el duplicado en los dos lugares de muestreo seleccionados, la piscina Panorámica y el canal de Vargas en el instituto de Turismo de Paipa.

De las 28 muestras recolectadas incluyendo duplicados, se enviaron 20 de las más representativas al laboratorio CYANAM S.A.S para el respectivo análisis considerando el día,

lugar y hora de muestreo. Se analizaron únicamente sulfatos y cloruros, debido a que las campañas realizadas anteriormente tuvieron en cuenta estos dos parámetros facilitando un análisis comparativo, además de ser los más elevados y los que están generando afectaciones al medio ambiente que lo rodea, al mismo tiempo las actividades que se realizan en la zona de Tundama y sus provincias vecinas, al verter las aguas termales residuales al río Chicamocha sin previo tratamiento. Se tuvieron en cuenta todas las recomendaciones de recepción y conservación de las botellas que contienen las muestras de agua.

Los resultados obtenidos por el laboratorio se encuentran en la Tabla 3.

Tabla 3.

Resultados obtenidos de la campaña realizada en el Instituto de Turismo de Paipa en el 2022

Fecha de Muestreo	Lugar de Muestreo	Hora de Muestreo	Cloruros (mg Cl- /L)	Sulfatos (mg SO42- /L)	Ocurrencia de Precipitaciones
13/04/2022	Canal de Vargas	14:10	6625	4645	No
13/04/2022	Piscina Olímpica	18:00	6894	5139	No
13/04/2022	Canal de Vargas	18:27	4907	4492	No
14/04/2022	Canal de Vargas	9:21	6175	2408	No
14/04/2022	Nacimiento Pozo Azul	14:10	6361	5103	No
14/04/2022	Nacimiento Pozo Azul	18:20	6087	4763	No

15/04/2022	Piscina Panorámica	10:00	6625	4645	No
15/04/2022	Canal de Vargas	10:30	4725	4945	No
15/04/2022	Piscina Panorámica	14:00	5279	4727	No
15/04/2022	Canal de Vargas	14:30	5642	4957	No

Nota. En la tabla se consignan los resultados de la cantidad en mg/L para cloruros y sulfatos, realizados por el laboratorio CYANAM S.A.S de 20 muestras (se cuenta el duplicado) realizadas en campo

Uno de los factores que aumentó considerablemente fue la afluencia de turistas en el ITP con un valor de 543,23% en comparación el año anterior, pero este no es un parámetro que afecte en mayor proporción los resultados obtenidos en cuanto a la concentración de cloruros y sulfatos en los tres puntos de muestreo registrados.

Según los resultados consignados en la Tabla 3, la concentración de iones cloruros y sulfatos en el canal de Vargas, lugar donde se vierten las aguas termales que siguen su curso hacia el río Chicamocha, están por encima de la normativa (Resolución 0631 del 2015) en un 2245,92 % y 1715,76 % respectivamente, la cual tiene un valor máximo permisible de 250 mg Cl⁻/L y 250 mg SO₄²⁻/L. La cantidad de cloruros con los valores más elevados siendo críticos para el análisis, se evidencia en el segundo día de muestreo en la mañana, siendo un jueves santo, por lo tanto, la cantidad de personas que ingresan al ITP para la época de Semana Santa es bastante elevada.

Además de esto se debe tener en cuenta que en las mañanas una de las tres piscinas siempre era desocupada para realizar el respectivo mantenimiento y limpieza, por lo que el caudal del vertimiento durante ese periodo de tiempo era mayor en relación con otras horas del día. El comportamiento de la cantidad de sulfatos es relativamente similar, pero para este el día en el que se registra una mayor concentración del ion SO₄²⁻ es el último día de la campaña de muestreo en horas de la mañana, un viernes santo. Este dato tiene relación con la cantidad de sulfatos presentes

en la piscina Olímpica el 13 de abril, puesto que el viernes se desocupó para el mantenimiento; y con la cantidad de este mismo ion en el Pozo Azul, quien abastece de agua termal a todo el Instituto.

En relación con otras campañas de muestreo realizadas años anteriores, se puede concluir que aunque la cantidad de turistas que ingresen al ITP se alta o baja, los vertimientos de estas aguas al río Chicamocha siguen siendo un factor importante y crítico que lo afectan directamente, esto se debe a que estas aguas por naturaleza vienen cargadas de grandes cantidades de sales y al no realizarse el debido tratamiento antes de dirigirlas al recurso de agua dulce van a alterar su composición y características.

Por otro lado, en el Instituto de Turismo de Paipa solo registran valores procedentes del Pozo Azul que abastecen sus piscinas, por lo que solo se evalúa la afectación de este al río Chicamocha. Pero no es el único que realiza dichos vertimientos, al ser una zona turística y hotelera, todos los establecimientos que forman parte de este sector, igualmente hacen uso de las aguas termominerales que posteriormente son vertidas al recurso hídrico.

En la Figura 24, se presenta el esquema planimétrico del ITP para poder identificar cómo se conecta el Pozo Azul con las piscinas para realizar el respectivo llenado de estas. El Instituto de Turismo de Paipa no cuenta con un plano de la red hidráulica, pero según la inspección ocular de Corpoboyacá se puede identificar que este llenado se ejecuta por medio de tres bombas, 2 de 20 HP y una de 5 HP [68]. Esto quiere decir que si cuenta con los instrumentos adecuados a lo largo de la red de tuberías para poder llevar un control y un correcto funcionamiento de este.

El valor de pH registrado se tomó en el laboratorio de la Universidad de América, donde se obtuvo un rango entre 6,44 a 7,47 (Figura 25); clasificándose como aguas neutras ligeramente ácidas. Este parámetro está dentro del rango permisible para vertimientos a aguas superficiales según la Resolución 0631/15, pero cabe destacar que este se debe mantener regulado, ya que, si se producen cambios significativos, podría llegar a afectar la fauna y flora que se encuentran alrededor del recurso hídrico [69].

Figura 25.

pH de las aguas del Instituto

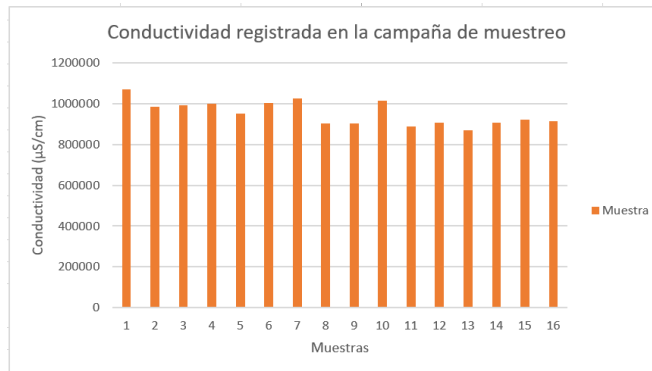


Nota. En la figura se observa el pHmetro con el dato más alto obtenido para las aguas provenientes del instituto de turismo de Paipa.

Otro parámetro a tener en cuenta es la conductividad eléctrica, como se puede observar en la Figura 26 se encuentran graficados mediante un gráfico de barras el valor de este para cada una de las muestras tomadas en la campaña de muestreo, siendo el valor más alto de 1'068.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y el más bajo de 870.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Estos elevados valores de conductividad están directamente relacionados con la alta cantidad de sales disueltas en el agua de las muestras realizadas, indicando que poseen una mineralización importante [70]. Además, este parámetro es de gran importancia ya que las variaciones de este pueden tener relación con la descomposición de la materia orgánica, de igual manera identificar los procesos de corrosión debido a los iones presentes [69].

Figura 26.

Conductividad eléctrica registrada en la campaña de muestreo.



Nota. En la figura se observa la conductividad registrada en cada una de las muestras tomadas en la campaña en el ITP.

Por último, según la clasificación propuesta por Nisbet y Verneaux, las aguas por encima de 500 µS/cm, se clasifican en cuanto a calidad como mineralización excesiva y agua contaminada, siendo las analizadas de esta característica, esto puede deberse a las propiedades de las aguas termominerales como cloruradas y sulfatadas [71].

3. IDENTIFICAR LOS RECURSOS NATURALES Y RESIDUOS AGROPECUARIOS CON POTENCIAL DE UTILIZACIÓN COMO MEDIO ADSORBENTE PARA TRATAMIENTO DE VERTIMIENTOS

En este capítulo se estudiarán los potenciales medios adsorbentes a utilizar para la adsorción de los contaminantes que están en mayor presencia en los vertimientos dirigidos al río Chicamocha, por lo que se procede a hacer una revisión bibliográfica de los residuos más utilizados en la industria como medios adsorbentes, posteriormente filtrando los residuos provenientes que se encuentren en la provincia de Tundama, los cuales serán el foco de investigación y análisis.

3.1. Potenciales medios adsorbentes a partir de recursos naturales y residuos agropecuarios

Los residuos naturales y agropecuarios poseen características para ser utilizados y aprovechados en la elaboración de nuevos productos, los cuales pueden darle un valor agregado mayor al desecho no utilizado inicialmente. Sus principales usos son el carbón activado, la obtención de bioenergéticos, producción de alimentos para animales, entre otros.

La generación de residuos son medios de contaminación, en algunos casos generando riesgos para la salud, ya sea por medio de residuos sólidos, gaseosos o líquidos, los cuales no son procesados, ni obtienen una disposición final conveniente. La mayoría de estos son vertidos a rellenos sanitarios y a aguas, generando olores y crecimiento de plagas [72], los cuales traen consigo afectaciones ambientales y sociales para el sector. Por lo que se recomienda hacerles un segundo uso a estos residuos, siendo utilizados como medios adsorbentes, debido a sus características tales como estructura porosa, área superficial y velocidad de adsorción [73].

Existen dos tipos de adsorbentes: los adsorbentes convencionales, suelen estar constituidos por carbón activado, alúmina activada, arenas y zeolitas, formando interacciones intermoleculares débiles con el adsorbato y los adsorbentes no convencionales, que provienen de desechos de la industria alimentaria y agrícola, como lo son desechos de fruta, residuos vegetales, plantas y demás [73].

Los residuos más utilizados para métodos de adsorción de contaminantes son los provenientes de frutas, el bagazo, la carbonilla, la paja, el cogollo, residuos de caña de azúcar, la cascarilla de arroz, entre otros [72]. Por lo tanto, se abordan aquellos que producen mayores residuos y sus potenciales usos en la adsorción.

3.1.1. Cáscara de frutas

Existen varios estudios los cuales utilizan los residuos de fruta para la formación de carbones activados, estos sirven en su mayoría para la adsorción de metales pesados, debido a su contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina [74]. Siendo un buen medio adsorbente brindando una alternativa a soluciones para la contaminación de metales pesados.

Como se menciona en el artículo titulado “evaluación de la capacidad de adsorción de carbón activado mediante cáscara de naranja (*Citru Cinensis*) para la remoción de iones de arsénico en aguas residuales industriales” se presenta el estudio de aprovechamiento de residuos orgánicos de frutas, enfocándose principalmente en la cáscara de naranja y su potencial uso como materia prima para obtención de carbón activado, el cual tendría un gran potencial para la adsorción de en aguas residuales, concluyéndose en este estudio que se obtiene una mayor adsorción en los metales tales como el Cd, Pb, Cu, As(V) [75].

3.1.2. Zuro de maíz

Mediante revisión bibliográfica se puede determinar que uno de los mayores usos del zuro de maíz además de la adsorción de metales pesados, es su capacidad para la adsorber fosfatos. Según el artículo “*Comparative study of the adsorption of phosphate by activated charcoal from corncobs, groundnut shells and rice-husks*” de A. Adbul and F. Aberuagba, se realiza una comparación a tres tipos de subproductos agrícolas las cuales fueron cáscara de arroz, zuro de maíz y cáscara de maní, donde por medio de un proceso de oxidación al vapor se midió la capacidad de adsorción de fosfatos para tratamiento de aguas residuales. Se realizaron una serie de pruebas experimentales con una solución estándar de fosfato de 0,50 g en 1 L de agua destilada, dando como resultado una adsorción de cáscara de maní, zuro de maíz y cáscara de arroz con valores de 2,11; 2,14 y 2,13 respectivamente, identificando el carbón de zuro de maíz como el de mejor adsorbente de fosfatos en solución acuosa [76].

Otro estudio respecto a la adsorción como proceso para la remoción de plomo en aguas residuales industriales usando el zuro de maíz y la cáscara de naranja, con el objetivo de encontrar las condiciones óptimas y más eficientes para cada uno de ellos, realizando una comparación entre sí. Como resultado, se obtuvo una mayor adsorción para un tamaño de partícula de 1mm para el

zuro de maíz y de 0,50 mm para la cáscara de naranja, logrando una remoción del 99,20% y 67,50% respectivamente, siendo el zuro de maíz más eficaz [77].

3.1.3. Cascarilla de arroz

Considerado uno de los desechos más abundantes debido a su gran producción en Colombia, en donde supera por región las 100.000 ton/año, además de tener una baja degradabilidad natural en donde se logra acumular en el ambiente soportando condiciones extremas de este [78]. Según el artículo de “*La descomposición térmica de la cascarilla de arroz: una alternativa de aprovechamiento integral*” se logra demostrar mediante estudios los diferentes usos en los que podría ser utilizada la cascarilla de arroz, mediante la descomposición térmica, logrando un aprovechamiento integral la cual puede ser reutilizada en cultivos agrícolas y aguas con contenido de cloruros.

El desarrollo industrial ha traído consecuencias desfavorables para el ambiente, como la cantidad de desechos tóxicos vertidos a recursos hídricos, por lo que se busca una forma económicamente rentable para el tratamiento de aguas residuales. Como propuesta se presenta la cascarilla de arroz, teniendo en cuenta la producción de arroz mecanizado en el país, con un valor de aproximadamente 1’558.044 toneladas, de las cuales 389.511 corresponden a cascarilla [79], como se menciona en el artículo “*La cascarilla de arroz como una alternativa en procesos de descontaminación*”, en el cual se logra demostrar la disminución de metales pesados, perfilando a la cascarilla como una alternativa viable y económica para tratar contaminantes en efluentes con dichas características.

3.1.6. Hueso de bovino

El presente trabajo de grado titulado “*Evaluación de la adsorción de partes óseas de res en un dispositivos de flujos continuo, para la remoción de iones de calcio, magnesio, aluminio, hierro, sulfato, carbonato y cloruro; a escala de laboratorio*” Realiza un estudio de varios contaminantes en aguas donde se estudian dos de los contaminantes de interés los cuales son los iones cloruro y los sulfatos obteniendo una remoción baja de cloruros y media de sulfatos respecto a los ingresados en el sistema, lo que se planteó para el estudio fue agregar hueso molido en un

tubo pvc para simular el flujo continuo en este a escala laboratorio y así medir la adsorción que se obtiene mediante el paso del agua con el contaminante por el tubo para los resultado de este se obtuvieron que el ion hierro obtuvo el mayor porcentaje de adsorción (90,37 %) y el cloruro fue el que tuvo menor porcentaje de adsorción (12,24 %) [80].

Aunque el hueso de bovino sirva para muchos de los contaminantes mencionados anteriormente este también tiene la función de remoción para oro según el artículo *“Caracterización del carbón activado de huesos de alpaca (vicugna pacos) por activación química con hidróxido de sodio, ácido fosfórico y tiempo de pirólisis”* Donde se logró evaluar la capacidad de adsorción de oro utilizando una solución cianurada a una concentración de 21.33 mg/L convirtiendo el hueso en carbón a un temperatura de 500°C en donde obtuvo características fisicoquímicas con rendimiento (30.73%), humedad (1.15%), cenizas (25.23%), material volátil (51.04%), carbono fijo (30.85%) y carbono fijo (43.92%) a un pH de 6.8 y densidad aparente de 0.73 g/cm³ favoreciendo a la adsorción de oro en un 89.41 % Callo Choquepuma, A. J., & Flores Quispe, N. D. (2020). Caracterización del carbón activado de huesos de Alpaca (Vicugna pacos) por activación química con hidróxido de sodio, ácido fosfórico y tiempo de pirólisis [81].

3.1.7. Carbón mineral

El carbón activado ha sido reconocido como uno de los adsorbentes más populares y ampliamente utilizados en el tratamiento de agua y aguas residuales en todo el mundo y aunque tiene una gran funcionalidad de adsorción, según el artículo *“Ammonia-modified activated carbon for the adsorption of 2,4-dichlorophenol”* en el que se estudia la capacidad de adsorción sobre la modificación de la superficie del carbón activado usando amoniac. Observándose un aumento de adsorción de 2,4-DCP de 232,56 a 285,71 mg / g (22,86% más alto) lo que se explica debido a los grupos funcionales superficiales básicos creados por el nitrógeno. -incorporación (mediante tratamiento con amoniac) que hizo que el carbono fuera más básico; y creó una superficie que estaba cargada más positivamente y, por lo tanto, mejoró la absorción de carbón activado [82].

Existen diferentes tipos de carbón, como lo es el coque el cual tiene cualidad de eliminación del contaminante de DQO el cual afecta algunas fuentes hídricas y especies que viven en ella, esto se logró demostrar mediante el artículo *“Coque activado en polvo para la eliminación de DQO en el tratamiento avanzado de aguas residuales de mezcla química y regeneración por oxidación de*

Fenton” en donde mediante una serie de experimentos se logró demostrar que los valores iniciales de DQO en el efluente biológico estaban en el rango de 140 a 180 mg / L, la DQO final en las aguas residuales tratadas disminuyó a menos de 80 mg / L con la dosis de coque activado en polvo de 0,609 g / L [83].

3.2. Determinación de los recursos naturales y residuos agropecuarios presentes en Tundama

La provincia de Tundama está ubicada al norte del departamento de Boyacá (ubicado en el centro oriente del país), hace parte de las trece provincias que lo componen. Cuenta con nueve municipios los cuales son: Paipa, Santa Rosa de Viterbo, Floresta, Busbanzá, Corrales, Cerinza, Belén, Tutazá y su capital Duitama. Limita al noroccidente con el departamento de Santander, al sur con la provincia de Sugamuxi, al oriente con las provincias del Norte y Valderrama, y al occidente con la provincia del Centro [84].

Las cadenas productivas son aquellas que determinan todos los aportes de los participantes y procesos que interfieren en la actividad agrícola, desde que el producto sale de la finca hasta su entrega final al consumidor [85]. Por esto, es necesario identificar las cadenas presentes en Tundama las cuales se identifican en el Plan Departamental de Extensión Agropecuaria (PDEA) del departamento de Boyacá, para el periodo comprendido entre 2020 y 2023.

En primer lugar, se encuentra la papa, considerada como el eje fundamental de la economía de los municipios de Boyacá, convirtiéndose en el principal generador de ingresos. Los frutales, cereales y leguminosos, hortalizas, especies menores (comercialización de cerdos y aves de corral, al igual que sus productos derivados, y la apicultura), la piscicultura, y la cadena láctea y cárnica, en donde la ganadería es la actividad que más usuarios representa en el departamento [86]. Estas cadenas productivas ayudan a identificar los residuos que se pueden encontrar en mayor proporción y que por tanto no se están aprovechando o no se aplican buenas prácticas de desecho.

Para el año 2020, se evidencia que la mayor participación del departamento de Boyacá en la producción y área cosechada está asociada al tubérculo como la papa, con un porcentaje del 52,28% (237618416,45 Ton) y 37,18% (11559424,5 Ha), lo que corrobora la importancia de este cultivo para el departamento [87]. Se estima que un 12,6% corresponde a los residuos generados por este cultivo, lo que genera una contaminación en los suelos y fuentes de agua, además de una

pérdida económica para los cultivadores debido a que este porcentaje es comercializado a precios no rentables o por sus condiciones no es posible su comercialización [88]. Estos residuos también se convierten en focos de plagas y enfermedades [89], por esta razón se considera un residuo con potencial para usos alternativos diferentes al abono y compostaje.

Entre los residuos agroindustriales que se presentan en la provincia, específicamente en Duitama son los residuos sólidos especiales, que son el cebo y el hueso proveniente de las plantas de beneficio. Los autores del proyecto de grado titulado, “Formulación de medidas higiénico sanitarias y ambientales con énfasis en producción más limpia para los expendios cárnicos del municipio de Duitama.”, realizan una encuesta en donde se evidencia que solo el 21,2% de los establecimientos encuestados manejan una correcta disposición de los residuos, mientras que el 78,8% manifiestan no hacerlo. Además de esto, se registra que solo el 45,4% de los expendios generan entre 0 a 49 kg de residuos sólidos especiales, el 27,3% de 100 a 150 kg y el 27,3% restante de 150 a 200 kg. Todo esto acarrea descontento en la población ya que la mala disposición de dichos residuos genera malos olores y presencia de vectores [90].

Los huesos de res son unos de los mayores desechos en la industria cárnica, debido a su inutilidad en procesos posteriores al destace y al limitado o nulo consumo de los mismos, a pesar de su riqueza en fósforo, calcio, magnesio, flúor, entre otros. La forma de desecho de los huesos, generalmente, es mediante cuerpos de agua, se entierran en lugares no permitidos o se envían a algún relleno sanitario, contribuyendo así con las miles de toneladas diarias que se desechan [80].

3.3. Caracterización de las aguas termominerales según autores

Mediante la bibliografía consultada y recolectada, se pudieron seleccionar los parámetros en común y más representativos para la caracterización de las aguas termominerales estudiadas. Por esto, se escogen siete parámetros (Tabla 4) los cuales son: pH, temperatura del agua, cloruros, sulfatos, sólidos suspendidos totales, DBO₅ y DQO.

Tabla 4.

Parámetros necesarios para caracterizar las aguas termominerales provenientes de los vertimientos del ITP.

Parámetro	Unidades	Rangos según Resolución 0631 de 2015	Valores reportados por autores
pH	-	6,00 – 9,00	8,00 ^(A) ; [7,86 – 8,46] ^(B) ; 6,24 ^(C) ; 8,21 ^(D) ; 7,52 ^(E) ; [6,38 – 7,54] ^(B)
Temperatura del agua	°C	No registra	18,00 ^(A) ; [16,50 – 26,00] ^(B) ; 45,30 ^(C) ; 23,04 ^(D) ; 19,00 ^(E)
Cloruros	mg Cl ⁻ /L	250,00	3920 ^(A) ; [500,84 – 887,50] ^(B) ; 5828 ^(C) ; 5053,10 ^(F)
Sulfatos	mg SO ₄ ²⁻ /L	250,00	13100 ^(A) ; [1641,87 – 5242,15] ^(B) ; 17355 ^(C) ; 13100 ^(D) ; 8,90 ^(F)
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	50	<8 ^(A) ; [48,54 – 574,80] ^(B) ;
DBO ₅	mg/L O ₂	50,00	<5 ^(A) ; [15 - 21] ^(B) ; 17 ^(D) ; 5 ^(E)
DQO	mg/L O ₂	150,00	<20 ^(A) ; [230,66 – 391,33] ^(B)

Nota. Cada uno de los superíndices representa un trabajo de grado, artículo e investigación diferente. A continuación, se va a presentar cada uno de los superíndices con su respectiva referencia: A: (Canal ITP; Díaz, J. C. “Alternativas para el manejo y aprovechamiento de aguas termominerales post-uso del municipio de Paipa (Boyacá).” (2020). [En línea]. Disponible en: http://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/16406/1/DiazJuan_2020_AprovechamientoAguasTermominerales.pdf); B: (Dársena Il Cárdenas, L.M. & Agudelo, S. “Evaluación física-química del sistema de regulación de las aguas Termo-Minerales (Dársena LI) del Municipio de Paipa-Boyacá.” (2020) UNIVERSIDAD LIBRE, 119. [En línea]. Disponible en: <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/37274/BallesterosCabraLeidyHeraldine2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y>); C: (Pozo Azul; Gómez, D.A “Modelo geotérmico de Paipa mediante exploración del subsuelo y análisis físico químico de aguas termales” (2019). Tunja. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/001/3453/1/Modelo_geotermico_de_Paipa.pdf); D: (Canal ITP, Ballesteros, L.H. “Alternativas de manejo para la inactivación de coliformes totales de las aguas termominerales post uso del municipio de Paipa Boyacá” (2020), Bogotá D.C. [En línea]. Disponible en: <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/37274/BallesterosCabraLeidyHeraldine2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y>); E: (Canal ingreso, hotel Panorama Aponte, L.M. “Análisis del aporte contaminante generado por el vertimiento termomineral del hotel panorama (Paipa) sobre la fuente receptora río Chicamocha” (2019), Bogotá D.C. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/25530/1/PROYECTO%20FINAL%202021-12.pdf>); F: (Canal de Vargas (ITP), L. D. Duarte Sabogal y M. Mosquera Forero, “Alternativa de tratamiento de aguas provenientes de piscinas termales de Paipa para el posterior vertimiento en el río Chicamocha.” Trabajo de grado, Fundación Universidad de América, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/8662>).

De acuerdo a los valores recolectados de las diferentes fuentes bibliográficas, los puntos de muestreo que se presentan tienen gran similitud entre ellos, además todas las aguas que se

analizan van dirigidas al río Chicamocha. El primer parámetro que se presenta en la Tabla 4, es el pH, en donde todos los resultados obtenidos ninguno de ellos supera el rango permisible por la normativa el cual está estipulado desde 6,00 hasta 9,00. El valor más alto registrado se presenta en la Dársena II, que está comunicada con el canal de Vargas y posteriormente al río Chicamocha. De esta manera, las aguas se clasifican según su pH como neutras tendiendo a ser ligeramente ácidas.

En cuanto a la temperatura, según la Resolución 0631/2015 el valor máximo permitido para realizar vertimientos de aguas residuales puntuales a un cuerpo de agua superficial o a los alcantarillados, este no debe exceder los 40 °C. Pero se debe tener en cuenta que la diferencia entre los valores del agua residual y el punto donde será vertido tiene que tener una distancia mínima de 100 m y una diferencia de 5 °C [33]. De acuerdo a lo anterior en relación con los datos de la Tabla 5, no se incumple. El único valor que está por encima es el registrado en el Pozo Azul, pero de este lugar no salen vertimientos directamente al canal de Vargas, en este punto el agua está por encima de los 45 °C, por lo tanto, se caracteriza como tipo hipotermal [38].

La concentración de iones cloruro y sulfato en las aguas es >1000 mg/L, por lo tanto, se considera que es elevada, clasificándolas como aguas sulfatadas y cloruradas de alta mineralización [90], [35]. Excediendo los valores consignados en la resolución en mención, ya que el valor mínimo permitido es de 250 mg/L para cada una de las sales (Cl^- y SO_4^{2-}).

Los sólidos suspendidos totales (SST), hace referencia al material particulado que se encuentra en suspensión en las aguas superficiales y/o residuales [95], además se considera como un indicador global de la carga contaminante presente. El valor mínimo permitido es de 50,00 mg/L y este se excede en un 1149,60 % en la Dársena II, el cual según autores este está directamente relacionado con la cantidad de coliformes totales en el agua producto de las actividades humanas que se presentan en la zona [91], de modo que se sugiere instalar un sistema de tratamiento para disminuir este parámetro.

Por último, los dos parámetros faltantes son la DBO y la DQO. La Demanda Biológica de Oxígeno, se define como la cantidad de oxígeno que los microorganismos (bacterias, hongos y plancton) consumen durante la degradación de las sustancias orgánicas que contienen las aguas. Este parámetro se encuentra dentro del valor máximo permisible, de manera que no se requiere de algún tratamiento, pero si se debe seguir monitoreando periódicamente para llevar un control [91].

La DQO, es la cantidad de oxígeno necesario para oxidar la materia orgánica por medios químicos convirtiéndola en CO₂ y agua. En comparación con la normativa establecida, este se encuentra por encima del valor permitido lo que contribuye a la disminución de la capacidad de depuración de fuentes hídricas, disminución de la cantidad de oxígeno disuelto, salinización de suelos y pérdida de la biodiversidad acuática, lo cual altera negativamente la calidad del efluente hídrico [91].

En consecuencia, los parámetros que se deben tener en cuenta para un posterior tratamiento son: la concentración de cloruros, sulfatos y la Demanda Química de Oxígeno, ya que estos afectan directamente la calidad del río Chicamocha, el medio que lo rodea; así como también la función del distrito de riego y drenaje USOCHICAMOCHA, el cual se encarga de proveer el recurso hídrico al sector agropecuario y agroindustrial de la zona, y por último, afectando también a los habitantes que se suministran de este río.

4. ESTABLECER UN SECUENCIAMIENTO DE UNIDADES DE SEPARACIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE LOS VERTIMIENTOS DE LAS AGUAS TERMALES SEGÚN LA CARACTERIZACIÓN REALIZADA

En este capítulo va a abarcar los pretratamientos y tratamientos más usados para lograr la remoción de diferentes contaminantes como cloruros, sulfatos, DQO, entre otros, por medio de buscadores tales como Google Académico, Science Direct, SCielo, etc; y algunos repositorios como, Lumieres, entre otros. Para poder seleccionar el mejor secuenciamiento de unidades de separación. Seguido de ellos se van a estudiar en el laboratorio de la Fundación Universidad de América los potenciales medios adsorbentes seleccionados, los cuales fueron el hueso de bovino y el carbón mineral.

4.1. Tratamiento de aguas residuales

Para poder establecer un secuenciamiento de unidades de separación para el tratamiento de los vertimientos de las aguas termominerales provenientes del ITP, es necesario conocer qué es un sistema de tratamiento de aguas residuales, el cual tiene como objetivo mejorar la calidad física, química y bacteriológica con el fin de poder descargarla a los alcantarillados, a los cuerpos hídricos si se permite, o en dado caso entregarla a los usuarios con todas las propiedades y condiciones aptas para su reúso, de acuerdo a lo consignado en la Resolución 1256 de noviembre de 2021 [96] [97], en Colombia este tipo de tratamientos se debe regir en base a la Resolución 0631 de 2015.

Los tratamientos de las aguas residuales se clasifican en: tratamiento preliminar o pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario o avanzado [96].

4.1.1. Pretratamiento

Las aguas residuales llevan consigo cantidades considerables de sólidos en su camino hacia el tratamiento de aguas como lo son botellas, tapas, plásticos, piedras, entre otros. Logrando bajar la eficiencia e incluso dañar los equipos posteriores, produciendo el deterioro de las tuberías y de las bombas. Se plantea un pretratamiento para disminuir algunos efectos negativos que pueden surgir como variaciones en el caudal, la composición y sobre la presencia de materiales flotantes como aceites, grasas e incluso coliformes [98].

Este tiene como objeto remover del agua residual con operaciones físicas o mecánicas, todos aquellos elementos que puedan generar daños a los equipos posteriores ya sea por su naturaleza, composición o tamaño. Los procesos que se encuentran en esta etapa son: la separación de sólidos grandes, desbaste, tamizado, desarenado, desengrasado y pre aireación. Se eligen con respecto a las propiedades características del agua a tratar [99].

4.1.2. Tratamiento primario

Este alcanza a remover alrededor del 40% al 50% de los constituyentes que se necesitan quitar, se busca la reducción de los sólidos en suspensión por medio de tratamientos físicos o físico químicos. Debido a que la mayoría de los sólidos en suspensión hacen referencia a la materia orgánica disponible en el agua a tratar, se busca la reducción de la DBO. Los procesos que se pueden realizar en esta etapa es la remoción de sólidos, arena, tanques de sedimentación o decantación primaria, flotación, decantación junto con flotación, floculación y coagulación que son procesos físico químicos [99].

4.1.3. Tratamiento secundario

Tiene como objetivo minimizar los sólidos en suspensión a través de microorganismos aerobios o anaerobios, alcanzando a remover alrededor de 85% al 95% de los constituyentes. Se terminan de remover la DBO y los sólidos suspendidos que se encuentren en el agua a un valor 30 mg/L o menos. Estos procesos se basan en la utilización de grandes concentraciones de microorganismos, que se encargan de convertir la materia orgánica biodegradable en masa celular y sus derivados, posteriormente son eliminados mediante la sedimentación [98].

4.1.4. Tratamiento terciario

También conocido como tratamiento avanzado, tiene como objetivo alcanzar a eliminar todos los iones orgánicos y color residual, mejorando la calidad del agua con respecto a los tratamientos mencionados anteriormente. Este puede lograrse biológica o químicamente [100]. Los tipos de tratamiento que se encuentran en esta etapa son: adsorción de carbón activado,

intercambio iónico, ósmosis inversa, electrodiálisis, oxidación química (cloración y ozonización), métodos de eliminación de nutrientes (remoción de nitrógeno y fósforo), entre otros [99].

4.2. Identificación de unidades de sistema de separación

4.2.1. *Filtros para la primera fase de tratamiento*

Antes de la implementación de cualquier unidad de separación se plantea un tratamiento para disminuir la cantidad de sólidos suspendidos, grasas, aceites, DBO, DQO entre otros. Se plantea el diseño de lechos filtrantes con distintos materiales adsorbentes organizados de menor a mayor según la capacidad de adsorción y de mayor a menor según el espacio vacío (poros) del material filtrante, por lo que la selección de este, es el pasto seco como primer material, luego de cascarilla de arroz y finalmente aserrín [101]. Se debe tener en cuenta que, al ser biomateriales, la descomposición es un factor importante ya que puede representar un aumento de costos a nivel operativo por la frecuencia de reemplazo del medio filtrante o subproductos que se genere por la descomposición del material biodegradable.

Por lo tanto, es necesario hacer una evaluación general en un contexto real para poder observar el comportamiento del filtro seleccionado.

4.2.2. *Sistema de intercambio iónico*

El intercambio iónico es un conjunto de procesos el cual busca la eliminación al máximo de los iones mayormente cloruros y sulfatos que contenga el agua, en este tipo de procesos se utilizan resinas artificiales las cuales tienen la capacidad de intercambiar selectivamente sus propios iones por los iones del agua [102]. Estas resinas pasadas de un tiempo se sobrecargan y deben ser llevadas a un proceso de regeneración con ciertas sustancias o productos químicos que favorezcan a esta. Existen 4 tipos resinas diferentes las cuales son:

- **Resina catiónica fuerte:** Son utilizadas para la suavización de agua dura y también se utiliza como primera columna de desionización en los desmineralizadores o para lechos mixtos [103]. Se tienen en cuenta dos tipos de resinas cationes fuertes las resinas catiónicas de sodio las cuales se caracterizan por la eliminación de dureza en intercambio de sodio por el calcio y

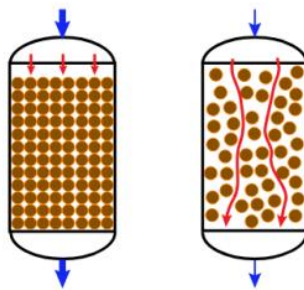
magnesio; y las resinas catiónicas de hidrógeno las cuales eliminan todos los cationes como calcio, magnesio, etc. Por intercambio de hidrógeno [104].

- **Resina catiónica débil:** Este tipo de resina suele utilizar grupos carboxílicos los cuales le dan una mayor eficiencia química en aplicaciones como la eliminación de alcalinidad de bicarbonato en tratamientos de agua y de igual forma para tratamiento de soluciones orgánicas acuosas, aunque su principal uso es en la descalcificación y ablandamiento de agua para reducir la carga iónica sobre los lechos cationes tiene una baja funcionalidad en pH bajos [103].
- **Resinas aniónicas fuertes:** Elimina principalmente aniones débiles en bajas concentraciones, como lo es el caso de carbonatos y silicatos [104]. Estas contienen grupos amino cuaternario, ionizados a cualquier valor de pH 3,6,7 [105].
- **Resinas aniónicas débiles:** Elimina los aniones de los ácidos fuertes, tales como sulfatos, nitratos y cloruros [104]. Estas contienen grupos amino primarios, secundarios o terciarios de escaso poder intercambiador [105].

Es importante tener claro los ciclos de cada resina. En primera se lleva a un proceso de intercambio el cual se logra hasta que la resina se sature, llevándola posteriormente a una regeneración y el aclarado que provoca un hinchamiento en esta, para el buen funcionamiento debe estar compacta como se muestra en la Figura 27, evitando espacios donde la sustancia a trabajar no pase correctamente por la resina [106].

Figura 27.

Comparación entre un lecho compacto y uno no compacto.



Nota. En la figura se muestran dos lechos el de la izquierda está compuesto por resinas permitiendo una buena distribución de la sustancia entre la resina y en la derecha se muestra un lecho que no está compacto mostrando pérdidas de contacto entre la sustancia y la resina. [En línea] https://oa.upm.es/56831/1/TFG_RODRIGO_SANCHEZ_VERA.pdf

La regeneración se puede dar en co-corriente, cuando el fluido de regeneración recorre la resina en el mismo sentido que la alimentación y en contracorriente cuando este fluido va en sentido contrario respectivamente. Se recomienda de igual forma realizar un lavado o aclarado de la columna con agua destilada tras la regeneración, así se logra una mayor eliminación de iones cloruros restantes dentro de esta [106].

Se manejan dos tipos de intercambio iónico, como lo es la parte de ablandamiento el cual es manejado con resinas catiónicas fuertes, mayormente de sodio las cuales son puestas en un “ablandador” [102]. El método de ablandamiento consiste en eliminar o disminuir la dureza del agua de una manera temporal o permanente [106] y el otro método es por medio de la desmineralización el cual busca llegar a una gran pureza en las aguas, este tipo de agua es utilizado en plantas, químicas, petroquímicas, fertilizantes, refinerías de petróleo, industrias farmacéuticas, de alimentos entre otras.

Es importante la eliminación de la dureza debido a que esta es causada por cloruros o sulfatos de calcio o magnesio, siendo un problema de contaminación en aguas debido a la dificultad de remoción que estas tienen, como lo es el caso de que no se pueda eliminar mediante la ebullición si no que hay que emplear métodos más complejos [106]. Aunque varios estudios han demostrado el intercambio iónico como la manera más eficaz y manejada para la remoción de cloruros y sulfatos en aguas contaminadas, por los buenos resultados de adsorción que estas tiene, con tasas de eliminación de hasta 99% para cloruros, de 98% para fluoruros y de 94% para sulfatos [107].

4.2.3. La electrocoagulación

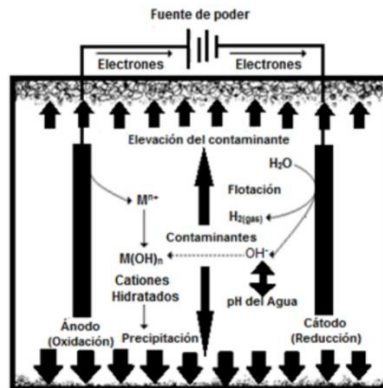
Debido a que en las últimas décadas el interés por encontrar nuevos métodos de tratamiento de aguas que usen cada vez menos productos químicos, mejoras en la eficiencia de remoción de contaminantes, reducción en el volumen de lodos, proporcionando un reciclaje del agua de proceso. Entre estos nuevos métodos se encuentra la electrocoagulación (EC) [108].

Este es un método de tratamiento terciario, el cual consiste en el suministro de corriente eléctrica para desestabilizar partículas contaminantes y en suspensión, y la ruptura de emulsiones en medios acuosos. Para llevar a cabo la EC, es bastante sencillo ya que únicamente se requiere de una celda electrolítica con un cátodo y un ánodo, llamados ánodos de sacrificio en donde el ánodo

es el encargado de proporcionar los iones metálicos al sistema y el cátodo libera los iones hidróxidos y un gas electrolítico de hidrógeno; las reacciones que se presentan se pueden evidenciar en la Figura 28. Al suministrar iones a la solución se va a producir la coagulación in situ de los contaminantes que son fácilmente sedimentables [109].

Figura 28.

Reacciones dentro de un reactor de electrocoagulación.



Nota. En la figura se muestra una celda electrolítica donde se lleva a cabo electrocoagulación y las tres reacciones que ocurren dentro de ella. [En línea] <http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/65337/TESIS-split-merge.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

Este proceso se puede dividir en tres etapas:

- Primera etapa: la oxidación electrolítica del electrodo de sacrificio genera la coagulación.
- Segunda etapa: se presenta la desestabilización de los contaminantes y de las partículas sólidas que se encuentran en suspensión.
- Tercera etapa: se agregan las fases desestabilizadas para generar flóculos que serán retirados por sedimentación [109].

Algunas de las ventajas que tiene la electrocoagulación son [108], [109]:

- Los costos de inversión y mantenimiento en comparación con otros métodos de remoción de contaminantes.
- La producción de lodos es baja y su separación es sencilla, puesto que están compuestos en su mayoría de óxidos metálicos/hidróxidos.
- Hay estudios que evalúan la posibilidad de realizar la EC con energía solar.

- Es capaz de eliminar el color y el olor.
- Con respecto a la coagulación química, la EC posibilita operar en un rango de pH más bajo.
- La formación de flocs más estables va a permitir la separación por sedimentación.
- En comparación con otros procesos químicos, durante la EC se genera un efluente con menor cantidad de sólidos disueltos totales, esto se refleja como una disminución en el costo de la recuperación del agua.

El material del que están hechos los electrodos comúnmente son el hierro (Fe) y el aluminio (Al) debido a sus formas trivalentes y la baja solubilidad de sus hidróxidos, los dos pueden ser del mismo material y estar dispuestos en modo monopolar y bipolar. También se han ido adelantando estudios del uso del titanio como electrodo [108].

Se han realizado diferentes estudios sobre la electrocoagulación con el objetivo de mejorar la calidad de los efluentes, donde los electrodos de sacrificio hechos de Al y Fe, con un tiempo de retención entre los 20-40 minutos. Removiendo DQO en un rango entre 82% y 94%. Al usar los dos electrodos de aluminio se encontraron las mejores eficiencias. Además de esto también, se han realizado estudios sistemáticos de remoción de sulfatos en aguas de minerías por medio de CE usando electrodos de hierro y aluminio removiendo parcialmente los sulfatos, con un porcentaje de 54 y 10 respectivamente [109].

La electrocoagulación se puede considerar como un tratamiento previo a los filtros para evitar una rápida descomposición de los biomateriales debido a las altas concentraciones de iones cloruro y sulfato que contienen las aguas en estudio.

4.2.4. Ósmosis inversa

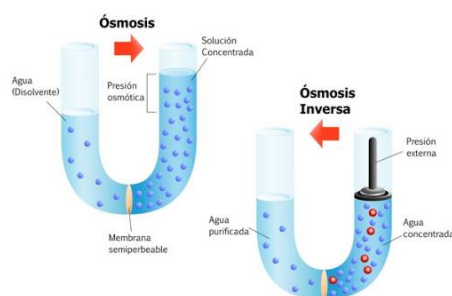
Este método permite eliminar la salinidad del agua, se hace mediante un proceso de difusión a través de una membrana semipermeable que facilita el paso de gases disueltos y moléculas sin carga electrostática de bajo peso molecular [110]. Existen diversas membranas de ósmosis, cuya configuración varía en función del agua a tratar, como lo son las membranas en espiral, las membranas de discos y las membranas vibrantes.

En la ósmosis lo que se busca es que las moléculas se muevan a través de una membrana semi permeable porosa, de una región de menor concentración a una de mayor concentración, donde el objetivo es igualar la concentración de ambos lados [110].

En la ósmosis inversa, usa una presión superior a la presión atmosférica, consiguiendo un efecto contrario, sabiendo que en cuanto mayor sea la presión aplicada, el flujo permeado aumenta de forma proporcional [110]. La comparación de estas dos se puede evidenciar en la Figura 29.

Figura 29.

Comparación entre ósmosis y ósmosis inversa



Nota. En la figura se hace una comparación entre la ósmosis y la ósmosis inversa, mostrando la diferencia entre presión atmosférica con respecto a una presión aplicada. [En línea] <https://n9.cl/nv49w>

El tratamiento mediante la ósmosis inversa favorece a la reducción de sólidos totales disueltos, incluyendo una variedad de iones, metales, contaminantes orgánicos, algunos detergentes y pesticidas (Tabla 5) [111].

Tabla 5.

Iones, partículas y microorganismos retenidos mediante el proceso de ósmosis inversa

<i>Iones y metales</i>	<i>Arsénico, Bario, Bicarbonato, Cadmio, Calcio, Carbonato, Cloruro, Cromo, Cobre, Fluoruro, Hierro, Plomo, Magnesio, Manganeso, Mercurio, Nitrato, Potasio, Sodio, Selenio, Sodio, Sulfato.</i>
<i>Compuestos orgánicos</i>	<i>Benceno, Tetracloruro de carbono, Diclorobenceno, Tolueno, Tricloroetileno</i>

<i>Partículas y microorganismos</i>	<i>Asbestos, Cysts (Protozoos), bacterias, hongos.</i>
<i>Pesticidas</i>	<i>1,2,4- triclorobenceno, 2,4-D, Atrazina, Endrin, Heptachlor, Lindane, Pentaclorofenol</i>

Nota. En la figura se enmarcan los iones, metales, compuestos orgánicos, partículas, microorganismos y pesticidas que logran ser retenidos en la ósmosis inversa. [En línea] <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/13789/1052040776.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Se plantea como tratamiento para remoción de cloruros la ósmosis inversa debido a su alto contenido de disminución de sólidos disueltos, logrando una capacidad de remoción de un 90-99.5%. Se caracteriza como un buen método de remoción de cloruros por permitir la remoción de la mayoría de sólidos tanto orgánicos como inorgánicos disueltos en el agua, alcanzando una remoción de un 99%, es considerada como una tecnología simple sin mucho mantenimiento [111].

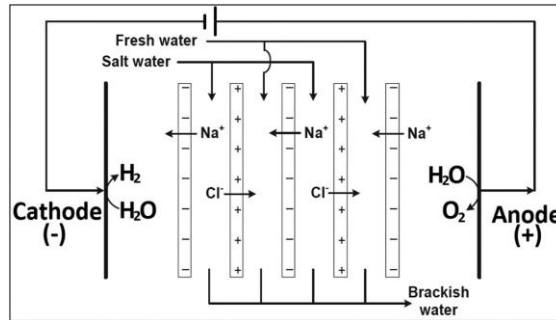
4.2.5. Electrodiálisis (ED) y Electrodiálisis inversa (EDR)

La electrodiálisis y la electrodiálisis inversa junto con la ósmosis inversa son procesos de desalinización que utilizan membranas para la purificación y obtención de agua dulce potable, estos procesos se emplean para fines municipales y por supuesto industriales. Ayudan a la conservación y preservación de los recursos hídricos actuales [111], en este caso dirigido a la prevención de la contaminación del río Chicamocha causada por los vertimientos de aguas termominerales procedentes del sector turístico y recreativo en el municipio de Paipa.

La electrodiálisis es el proceso mediante el cual se quitan o retiran especies iónicas de una solución electrolítica, por medio de una membrana de intercambio iónico al cual se le proporciona un voltaje de corriente continua para que se pueda efectuar [111]. La celda unitaria (Figura 30) donde ocurre el proceso se compone de membranas de intercambio de cationes, membranas de intercambio de aniones, un grupo de compartimientos diluidos para purificar el agua y otro grupo de compartimientos concentrados para almacenar las impurezas. En los electrodos que están ubicados a los extremos de la pila se producen las reacciones redox, por medio de un voltaje inducido por un dispositivo externo que posibilita el transporte de iones [112].

Figura 30.

Celda básica de electrodiálisis.



Nota. En la figura se muestran todos los elementos necesarios para hacer posible el proceso de electrodiálisis. [En línea] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610212007485>

La ED remueve selectivamente los sólidos disueltos, teniendo en cuenta la carga eléctrica suministrada, de esta manera se transfieren los iones de agua salobre a través de la membrana de intercambio iónico semipermeable que está cargada con un potencial eléctrico. El agua que alimenta la celda se divide en tres tipos diferentes [111]:

- Agua de producto, es la que resulta del proceso, tiene una baja conductividad aceptable y nivel de sólidos totales disueltos (TDS).
- Salmuera, o también llamado concentrado, es el agua que está cargada de los iones de agua salobre.
- Agua de alimentación del electrodo, es el agua que no está tratada, la cual pasa directamente sobre los electrodos que generan el potencial eléctrico.

La electrodiálisis inversa tiene el mismo principio que la ED, pero difieren en que se alteran periódicamente las polaridades de los electrodos puesto a que los flujos de agua de alimentación cambian su sentido, de dos a cuatro veces por hora, es decir, los conductos transportaban la salmuera pasan a recibir el agua depurada y al revés, por la tanto los comportamientos y las reacciones químicas en los electrodos también cambian. La EDR elimina el riesgo de precipitados, incrustaciones y obstrucción en las membranas ya que al invertir el sentido de las corrientes cada cierto tiempo el flujo de agua ayuda a la limpieza dentro de la celda [111]. La configuración del sistema es muy parecida al ED, exceptuando por la presencia de válvulas de inversión.

Es importante tener en cuenta que estos métodos son usados principalmente en plantas de escala baja a mediana, con un rango mínimo de 100 m³/d a un máximo de 20000 m³/d. Además, se encuentran limitadas por la gran cantidad de energía que necesitan para producir la corriente constante que va a hacer posible la purificación y bombea el agua a través de todo el sistema, y la dificultad al momento de cambiar membranas y resinas. Razones por la cual no son recomendados para aguas con concentraciones mayores a 5000 mg Cl⁻/L puesto que el gasto energético y de membranas para llevar a cabo la purificación es directamente proporcional a la cantidad de sales que se deben remover [111].

Por lo tanto, la implementación de esta técnica en el tratamiento de las aguas vertidas provenientes del ITP no sería aplicable, porque según los resultados obtenidos de la concentración de iones cloruros consignados en la Tabla 4, el promedio de las muestras es de 5932 mg Cl⁻/L, considerándose inviable económicamente, a menos de que se implemente algún tratamiento previo que disminuya la cantidad de cloruros en las aguas evaluadas.

4.3. Criterios considerados para la selección y evaluación de las alternativas de tratamiento

Para la selección del secuenciamiento para las alternativas de tratamiento, nos basamos en algunos criterios de evaluación, los cuales cumplen con la normatividad de tratamiento de aguas [35], debido a que este es un recurso hídrico, esta elección viene condicionada por una serie de factores, como lo son las condiciones reales del entorno, las características de las aguas, entre otras [113]. Los pasos a seguir para la selección fueron tomados en base al trabajo de grado “Alternativa de tratamiento de aguas provenientes de piscinas termales de Paipa para el posterior vertimiento en el río Chicamocha.” por los autores L. D. Duarte Sabogal y M. Mosquera Forero, en donde se expusieron cinco principales criterios en la toma de decisiones los cuales fueron:

1. Impacto ambiental generado por el tratamiento: debido al tipo de emisión que pueda generar, además de la cantidad y tipo de residuo que sean utilizados en el proceso.
2. Costos de implementación y mantenimiento: se busca una implementación de procesos económicamente viables para la solución del problema, esto se hace mediante una selección de procesos con materias primas no costosas y sistemas de bajo mantenimiento.
3. Nivel de pureza alcanzado al final del proceso: lo que se busca en este ítem es bajar la concentración de cloruros, sulfatos, DQO, DBO, entre otros de sus contaminantes que están por

encima del rango permitido (Resolución 0631/2015). Logrando que estas aguas vertidas cumplan con la normatividad, la cual no busca en su totalidad eliminar todos los contaminantes, pero sí reducir su valor para que no genere afectaciones críticas al ambiente.

4. Espacio ocupado por los equipos del tratamiento: teniendo en cuenta que es un sitio público el lugar donde se plantea este sistema, hay que tener en cuenta el área de los equipos a utilizar como de igual manera el área ofrecida por el Instituto para su puesta en funcionamiento.

5. Grado de avance técnico del tratamiento: finalmente se describe qué tan nueva es la tecnología a utilizar, la complejidad de operación y mantenimiento que esta pueda tener.

4.4. Selección primera fase de tratamiento

Para la selección de secuenciamiento del tratamiento preliminar, a través de revisión bibliográfica, con el objetivo de liminar inicialmente los componentes más pesados como lo son las grasas, sólidos suspendidos, pasando por DQO y DBO, hasta los iones cloruros y sulfatos. Teniendo en cuenta el tipo de material adsorbente que se maneje, el método y el tipo de tecnología utilizada, se seleccionará el mejor modelo de secuenciamiento, buscando la remoción de la mayor cantidad de contaminantes presentes en las aguas. Antes de realizar la remoción de sales de las aguas se propone un tratamiento preliminar, además es necesario para que las unidades posteriores no se vean afectadas y su eficiencia disminuya.

Según el artículo científico “*Simulation of sea Water Pretreatment for Desalination*” por los autores Gómez & Vera (2013), se habla de la realización de un tratamiento para las aguas de mar, mediante el uso de un filtro convencional de lecho mixto de arena sílice y arena, este filtro se hace mediante una cámara de 17,50 cm con un diámetro de cilindro de 6,33 cm y de una capa de arena de espesor de 4,00 cm con un diámetro de partícula de 0,50 mm, la cual después es pasado por unas membranas de micro y ultrafiltración que permite la remoción de iones de sales disueltos, donde los resultados obtenidos afirman una mejor viabilidad utilizando un pretratamiento con la tecnología de membranas, que el pretratamiento con los filtros puesto que se obtiene una mejor calidad de agua [114].

El trabajo de grado “Análisis de Alternativas para la Remoción de Cloruros presentes en las Aguas Residuales Industriales de Producción del Campo Cicuco Ecopetrol S.A.” por los autores Galván & Planeta (2017), realizan un diseño de pretratamiento el cual cumpla con los parámetros establecidos y favorezca la remoción de iones y sales, tratando en primera instancia la

contaminación por sólidos suspendidos, grasas, DBO y DQO, entre otros. Buscando alternativas de bajo costo y una mayor eficiencia, por lo que se propone un lecho filtrante, organizado en materiales de menor a mayor capacidad de adsorción y de mayor a menor según el espacio vacío (poros) del material filtrante. La selección de los materiales para el filtro fueron de pasto seco, luego de cascarilla de arroz y finalmente aserrín (Figura 31) [101].

Figura 31.

Diseño de filtro mediante diferentes materiales.



Nota. En la figura se muestra la secuencia de filtro para remoción de algunos contaminantes presentes en aguas, como lo son sólidos, grasas, DQO y DBO [En línea] <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/13789/1052040776.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Según la publicación de la revista DYNA “*Diseño de la planta de Tratamiento de Agua residuales y de Producción evaluando las diferentes alternativas Nacionales y Extranjeras aplicación 183 Campo Colorado*” Por los autores Jaime & Pico (2009). Hace una muestra de diferentes técnicas de desalinización existentes dando una propuesta para aguas con altos contenidos de DQO, COT, SS, y pH mayor a 7, presentando una técnica para la disminución de los parámetros existentes de ósmosis inversa como tratamiento terciario debido a que presenta costos aceptables, fácil operatividad y bajo consumo energético, también se hace la propuesta de un pretratamiento que se basa en un filtro de doble flujo marca SFX, el cual combina flujo arriba y abajo con filtración multimedia a través de un lecho, eliminando así partículas de dos micras de tamaño o mayores a estas ayudando así que el tratamiento de ósmosis tenga un mayor rendimiento [115].

Para la selección del pretratamiento se seleccionan los métodos anteriormente nombrados y se realiza una tabla con los factores que se deben tener en cuenta para la elección donde cada uno de estos se evaluará del 1 al 5 siendo 1 la calificación más baja y 5 la más alta, como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6.

Calificación correspondiente para la matriz de selección

Escala	Numeración
Excelente	5
Muy bueno	4
Bueno	3
Regular	2
Deficiente	1

Nota: La tabla muestra la clasificación numérica de las escalas que se tendrán en cuenta para la selección de nuestros procesos.

Tabla 7.

Calificación correspondiente para la matriz de selección pretratamiento

Criterio	Métodos propuestos para el pre-tratamiento		
	Filtro de arena sílice y arena	Filtro mediante (Pasto seco, cascarilla de arroz y aserrín)	Filtro de doble flujo
Impacto ambiental	4	4	4
Costos de implementación y mantenimiento	5	5	3
Nivel de pureza alcanzado	4	4	5
Espacio ocupado por los equipos	3	4	3

Grado de avance técnico	3	3	4
Total	19	20	19

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la Tabla 7, el filtro a base de materiales como el pasto seco, cascarilla de arroz y aserrín, es el seleccionado al ser el más apto para nuestro objetivo, debido a que es un proceso económicamente viable al implementar residuos agropecuarios de bajo o nulo costo, permitiendo la remoción de los contaminantes pesados como sólidos suspendidos, DQO y DBO, como grasas y posibles heces fecales que pueda tener las aguas. Como se mencionó anteriormente, al ser esta una propuesta teórica es necesario evaluarla a una escala real para observar comportamientos como la biodegradabilidad y costos operativos.

4.5. Selección segunda fase de tratamiento

Para la disminución de cloruros y sulfatos es indispensable aplicar un tratamiento terciario que reduzca cantidades apreciable de estos iones, según el trabajo de grado “Propuesta para la disminución de contaminantes en las aguas residuales provenientes de las piscinas termales del instituto de turismo de Paipa.” Acevedo & Cely (2020). No se encontró ningún tratamiento primario o secundario que logrará la disminución de estos compuestos, debido a que estos métodos funcionan para la remoción de DBO solubles y sólidos de gran tamaño para esto se hace la alternativa de un pretratamiento donde ayuda a disminuir estos la remoción de estos contaminantes diferentes a los iones [3].

Tabla 8.

Calificación correspondiente para la matriz de selección segundo tratamiento

Criterios	Métodos propuestos para el pre-tratamiento			
	Sistema de intercambio iónico	Electrocoagulación	Ósmosis inversa	Electrodiálisis (ED) y Electrodiálisis inversa (EDR)

Impacto ambiental	3	2	2	2
Costos de implementación y mantenimiento	2	1	2	1
Nivel de pureza alcanzado	5	5	5	5
Espacio ocupado por los equipos	4	3	4	4
Grado de avance técnico	4	4	4	5
Total	18	15	17	17

Considerando los resultados obtenidos en la Tabla 8, el intercambio iónico debido a sus características es la opción más viable para remoción de iones cloruro e iones sulfatos, y es más económicamente viable que las demás propuestas presentadas, con esta propuesta de secuenciamiento se busca cumplir lograr el nivel límite establecido en la resolución 0631 de 2015.

Para la selección del tratamiento terciario se utilizó el mismo formato de matriz de selección que para el tratamiento preliminar en el que de acuerdo a los criterios evaluados el que tuvo una mayor puntuación fue el sistema de intercambio iónico, con un valor de 18 puntos como se puede evidenciar en la Tabla 8. Donde se propone la utilización de una columna de intercambio iónico usando una resina aniónica de base débil, puesto que se utilizan en aguas que se caracterizan por tener altos niveles de cloruros o sulfatos, ya sea en casos donde no se requiera la eliminación de la alcalinidad y del silicio, diferenciándose por esta última característica de la resina aniónica de base fuerte [35].

Además de esto, varios estudios han demostrado el intercambio iónico como la manera más eficaz y usada para la remoción de cloruros y sulfatos en aguas contaminadas, logrando tasas de eliminación de hasta 99% para cloruros y de 94% para sulfatos [116]. Logrando cumplir el límite establecido en la Resolución 0631 de 2015.

4.6. Selección de medios no convencionales

Para la selección de los recursos o residuos con potencial de adsorción, se utilizaron referencias bibliográficas de las cuales proporcionaron información de adsorción para los contaminantes como cloruros y sulfatos, puesto que se encuentran en mayor proporción en los vertimientos de las aguas termales, otros factores a tener en cuenta fueron, la disponibilidad en la provincia de Tundama y que logre una disminución en los porcentajes de contaminación que los iones cloruro y sulfato aportan al río Chicamocha produciendo afectaciones en este, a las especies marinas y a la comunidad cercana. Por lo tanto, se selecciona y plantea un estudio del hueso bovino como residuo agropecuario y el carbón mineral como recurso natural en Tundama.

4.6.1. Hueso bovino

Los huesos del esqueleto, son los encargados de sostener las partes blandas del animal como la carne, músculos, tejidos y demás. Permiten el movimiento integrando un sistema de palancas, por medio de las articulaciones y puntos fijos en las inserciones musculares y de los tendones. La relación entre la masa muscular y el hueso es directamente proporcional, por lo tanto, entre mayor sea la cantidad de músculo, mayor será el peso del hueso [117].

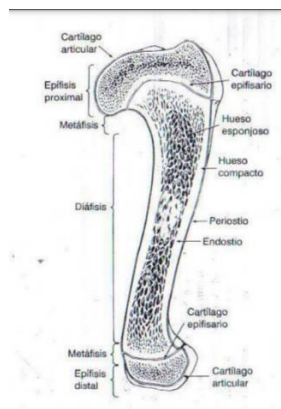
Los huesos se pueden clasificar en cuatro tipos:

- Los huesos largos: estos tienen forma cilíndrica y presenta ensanchamiento en los extremos, la parte tubular cilíndrica contiene la médula ósea. A este grupo pertenecen los huesos de las extremidades delanteras y posteriores [118].
- Los huesos planos: son únicamente de dos dimensiones con dos capas de hueso compacto y una capa en el medio de hueso esponjoso. Conformando este grupo, se encuentra la escápula y la mayoría de los huesos del cráneo [118].

- Los huesos cortos: su longitud, ancho y grosor tienen medidas similares, están compuestos por hueso esponjoso y recubiertos por una capa delgada de hueso compacto. En este grupo se encuentran el carpo, tarso y huesos que se desarrollan junto a las articulaciones [118].
- Los huesos irregulares: este último grupo lo conforman las vértebras y los de la base del cráneo [118].

Figura 32.

Componentes y partes anatómicas de un hueso típico largo.



Nota. En la figura se señalan cada una de las partes y componentes anatómicos de un hueso típico largo. [En línea] <https://n9.cl/m7j3y>

En la Figura 32 se pueden observar las principales partes anatómicas de un hueso largo típico. Este está compuesto desde el exterior hacia su interior como el periostio, hueso compacto, hueso esponjoso, endostio y cavidad medular, la cual solo está presente en estos tipos de hueso (largo) [118].

La composición del hueso es: el colágeno, la sustancia fundamental y minerales. Los dos primeros componentes (colágeno y la sustancia fundamental) hacen referencia a la parte orgánica del hueso, y las sales minerales comprende la parte inorgánica. La relación entre la parte orgánica frente a la inorgánica es 1:2 aproximadamente [118].

Entre el 65% y el 70%, corresponde a la parte mineral; y del 30% al 35%, a la parte orgánica sobre la base del peso seco. En la Tabla 9 se consigna la composición del hueso de toro [118].

Tabla 9.

Composición de un hueso de toro desgrasado y seco.

Nutriente	Porcentaje
Colágeno	33,30
Fosfato de cal	57,35
Carbonato de cal	3,85
Fosfato magnésico	2,05
Carbonato y cloruros sódicos	3,45
Total	100,00

Nota. Tomado de: Sisson y Grossman, quinta edición. [En línea]. Disponible en: <https://store.grupoasis.com/es/anatomia/1101-anatomia-de-los-animales-domesticos-tomo-i.html>

El colágeno es una proteína fibrosa que comprende un tercio del total de la proteína total del animal, pero en los huesos el porcentaje de esta es del 95% refiriéndose a la parte orgánica. Su función principal es proporcionar resistencia a los tejidos formando una estructura rígida en red confiriéndole esa característica a los huesos [118].

Esta estructura orgánica también llamada colágena viene acompañada de la hidroxiapatita (HAP), el cual es un biocristal conformado por átomos de Ca, P e H₂, como su fórmula química lo describe Ca₁₀(PO₄)₆(HO)₂. Este mineral también presente en los dientes confiere las características de dureza, pertenece a la familia de las apatitas y presenta una estructura hexagonal. Las apatitas también están presentes en la naturaleza haciendo parte de las rocas sedimentarias y metamórficas [120].

Los principales componentes químicos de la HAP son el calcio y el fosfato, pero se debe considerar que también contiene cantidades mínimas de sodio, cloro, carbonatos y magnesio, lo cual hace que no se considere pura [120]. Al ser un mineral de fosfato con gran estabilidad y estructura, se ha considerado su uso como biomaterial, adsorbente e intercambiador de iones [121]. Varios estudios realizados han demostrado su gran implementación en el tratamiento de aguas residuales, como aquellas que contenían cobre y zinc; también su alta capacidad de adsorción sobre metales pesados [122].

Los huesos de bovino al no ser comestibles por su propiedad de rigidez y dureza, en considerado un residuo agropecuario que se encuentra disponible en la provincia de Tundama, al no realizarse el debido manejo de estos se produce contaminación a los suelos y en general al ambiente donde se encuentra. Por esto, se han realizado diferentes investigaciones acerca de la aplicación funcional del polvo de hueso de res en forma de nano, micro y macro partículas. Se han obtenido resultados favorables ya que produce mejoras en la resistencia y propiedades de desgaste cuando es utilizado como refuerzo y relleno. También se ha explorado sobre su capacidad de adsorción en metales pesados [123].

Además, otras investigaciones han propuesto el uso de un biocarbón a base de hueso animal ya que posee una estructura cristalina pobre como un buen sorbente para la adsorción [123]. Por estas razones se mencionan los siguientes trabajos de grado y artículos de investigación en el cual hacen uso del hueso de bovino como medio adsorbente para la remoción de diferentes contaminantes en cuerpos de agua superficiales.

Según el trabajo de grado titulado *“Evaluación de la adsorción de partes óseas de res en un dispositivo de flujos continuo, para la remoción de iones de calcio, magnesio, aluminio, hierro, sulfato, carbonato y cloruro; a escala de laboratorio”* el cual logra por medio de tubo pvc simular un flujo continuo logrando la adsorción de los iones de interés tanto iones cloruros con una remoción de un (12,24%) y de iones sulfato de (34,55%) [80].

Figura 33.

Tubo pvc con hueso para remoción de contaminantes.



Nota. Tubo pvc con hueso para remoción de contaminantes, el cual simula un flujo continuo

La figura 33 muestra el modelo de laboratorio utilizado por el trabajo de grado para mostrar cómo por medio de un dispositivo cilíndrico de flujo continuo, en donde actúa el hueso sin

previamente hacerle una activación o tratamiento frente a algunos reactivos, el único paso realizado con los huesos fue la limpieza para la eliminación de las grasas propias de este y otras materias orgánicas y trazas de suciedad que pueda tener.

Con base al trabajo de investigación “Estudio de adsorción de fenol y 2,4- dinitrofenol desde solución acuosa sobre materiales porosos obtenidos a partir de huesos de bovino, porcino y pollo” por el autor Murillo Y.S (2011) se evalúa la capacidad de adsorción en soluciones de 2,4- dinitrofenol y fenol de distintas concentraciones, realizando las respectivas isothermas con base a los datos obtenidos, esto se realizó mediante una carbonización de hueso bovino, en donde los resultados dan una correlación en el orden 0,99 con el modelo de pseudo-segundo orden, de igual forma se evidencio en el estudio la fuerza iónica de adsorción sobre el fenol con arcillas organofílicas [120]. Este trabajo fue seleccionado teniendo en cuenta las similitudes encontradas entre algunas sales con los fenoles, como es el caso del cloruro de sodio el cual tiene una densidad de 1,08g/cm³ muy similar a la del fenol siendo de 1,07 g/cm³, otra característica la cual fue tomada en cuenta es la de peso molecular del fenol en comparación con la del cloruro de magnesio siendo de 95,22 g/mol y 95,21 g/mol respectivamente, se puede evidenciar por lo tanto que la estequiometria no difiere mucho pues el peso molecular es la base de la misma en las reacciones químicas [124].

4.6.2. Carbón mineral

El carbón está compuesto por elementos como, carbono, hidrógeno y oxígeno, de igual forma en pequeñas trazas de azufre, nitrógeno y otros elementos. Se tiene una clasificación de carbones con diferentes rangos desde la turba hasta la antracita del cual varía su porcentaje de carbono y su poder calorífico [125]. En la Tabla 10 se presentan los diferentes tipos de carbón.

Tabla 10.
Diferentes tipos de Carbón

	% de carbón	Poder calorífico (kJ/kg)
Turba	55,44	8400
Lignito	72,95	17200

Bituminoso (hulla)	84,24	30000-36000
Antracita	93,50	34000

Nota. En la tabla se observan los diferentes tipos de carbón que existen con sus respectivos porcentajes de carbón y su respectivo poder calorífico. [En línea] Disponible en: <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/iigeo/article/view/579/469>

La norma ASTM define como carbones de bajo rango aquellos cuyo poder calorífico bruto, sea menor a 6.390 kcal/kg, podemos encontrar en este rango los carbones denominados bituminosos y lignitos [126].

La confiabilidad y bajo precio del carbón mineral lo hacen un recurso importante para la industria, de igual forma la diversidad de emplearse en diversas actividades [125] Colombia es uno de los mayores productores de carbón mineral en América Latina, al norte del país se encuentra el carbón térmico, en la región central el carbón coquizable, aunque el 95% de las reservas se ubican en los departamentos de la Guajira, Cesar, Córdoba, Norte de Santander, Cundinamarca, Boyacá, Antioquia entre otros [127].

El grado de metamorfismo o carbonización al que puede estar sometido el carbón tiene gran relación con sus propiedades, debido a que el carbón de bajo rango como lo es el lignito y los sub-bituminosos, son típicamente de características blandas y fácilmente desmenuzables, tiendes a tener una apariencia opaca y de tierra, en comparación con los de alto rango que son duros y resistentes, entre mayor sea su rango mayor el contenido de carbono y energía del carbón, pero de forma contraria se disminuye su nivel de humedad [126].

En el municipio de Paipa, en el departamento de Boyacá es reconocido por sus aguas termominerales y las características terapéuticas que estas representan, incentivando el sector turístico y hotelero. Pero, también se deben mencionar otras actividades que se presentan de igual manera en mayor medida, la minería es una de ella ya que se encuentra ubicada en cinco zonas estratégicas para la producción de carbón térmico, las cuales son: sector el salitre, cruz de Murcia, el volcán, Sativa y Jazminal que en su mayoría de subsistencia se encuentran en un valor aproximado que está alrededor de las 250 y 300 Unidades Productivas Mineras (UPM) para el carbón específicamente [128].

Diferentes investigaciones indican que el carbón posee un potencial de adsorción para la aplicación como pretratamiento y tratamiento en la remoción de diferentes contaminantes. Al ser un mineral natural, su porosidad es relativamente grande al igual que el área específica de superficie, obteniendo un gran rendimiento en la adsorción de compuestos que alteran las propiedades y calidad de las aguas [129]. Por lo anterior, al conocer la gran disponibilidad de este recurso natural en la provincia de Tundama y las investigaciones acerca de la aplicación de este en la disminución de contaminantes, a continuación, se presentan algunos de ellos.

Según el artículo de investigación “Removal of organic pollutants in coking wastewater based on coal-based adsorbents: A pilot-scale study of static adsorption and flotation” por los autores Gao, Q., *et al.* (2021), se estudiaron cuatro adsorbentes a base de carbón para poder tratar aguas residuales de coque procedentes de Jining, China, antes del tratamiento biológico y después del tratamiento biológico, en donde los valores de DQO fueron de 3422 mg/L y 192 mg/L, respectivamente. Los minerales estudiados fueron, carbón de llama larga, carbón gaseoso, carbón coquizable y polvo de coque. Cada uno de los medios adsorbentes se trituraron, se tamizaron por medio de un tamiz con 74 μm , posteriormente se secaron a 100 °C en un horno durante un periodo de tiempo de 2 h antes de su uso [129].

Se demostró que el mejor adsorbente de los cuatro era el polvo de coque, ya que presentó la mayor tasa de eliminación de DQO, logrando tasas de eliminación del 60,30% y 74,00% del contaminante en mención antes y después del tratamiento biológico, respectivamente, durante un tiempo de agitación de 30 min. En cuanto a los adsorbentes de carbón el que mejores resultados arroja es el carbón de llama larga obteniendo una tasa de remoción de DQO de 47,30% antes del tratamiento biológico y 40,10% luego del tratamiento biológico; y el carbón con menos rendimiento fue el de coque porque hay una diferencia en los grupos funcionales de oxígeno en su superficie. Con esto se presenta un medio de adsorción económicamente viable, con grandes rendimientos y sostenible [129].

El artículo de investigación “Modification and application of coking coal by alkali pretreatment in wastewater adsorption” por los autores Li, S., *et al.*, (2017) acerca de la modificación del carbón coquizable con una solución alcalina (NaOH), para la aplicación en el tratamiento de aguas residuales de coque como medio de adsorción. Para la realización de este estudio, el carbón de coque se trituró hasta obtener un tamaño de partícula inferior a 0,074 mm, la

modificación del carbón se realizó, añadiendo 40 g de carbón de coque en cinco vasos de precipitados con 400 mL de la solución de NaOH, a diferentes concentraciones (1,00; 0,50; 0,10; 0,01 y 0,001 mol/L), luego se agitaron durante 10 min a 1000 rpm, se filtraron con agua desionizada hasta obtener un pH neutro, para finalmente secar la torta de carbón en un horno a 60 °C por 24 hrs [130].

Posterior a la modificación la superficie total del carbón era mayor que la del carbón crudo, esto se debe a que las moléculas del carbón reaccionaron con el hidróxido de NaOH y el lavado, ocasionó la formación de microporos adicionales. Esta tendencia se presentó entre las concentraciones de 0,001 y 0,10 mol/L; mientras que para concentraciones mayores el poro colapsó. De este modo las muestras pretratadas arrojaron una mayor capacidad de adsorción en comparación con el carbón sin pretratamiento, en donde la concentración de 0,1 mol/L de NaOH presentó los mejores resultados con una capacidad máxima de adsorción de 26 mg de fenol/g de muestra de carbón y 3,09 mg de quinolona/g de muestra. Además, cabe destacar que la adsorción del 75% de la capacidad de equilibrio se alcanzó a los 75 min, teniendo un potencial de viabilidad a gran escala [130].

Este artículo se tuvo en cuenta puesto que la densidad de cloruro de sodio es de 1,08 g/cm³, siendo una propiedad similar a la del fenol, teniendo en cuenta que esta depende del estado en el que se encuentre el compuesto, así como también de la temperatura y presión del mismo [124].

Otro artículo de investigación para la eliminación de DQO, se titula “Powdered activated coke for COD removal in the advanced treatment of mixed chemical wastewaters and regeneration by Fenton oxidation” de los autores Shen, L., *et al.*, (2019), estudian la viabilidad del uso de coque activado en polvo para la remoción de DQO del efluente biológico de una planta de tratamiento de aguas residuales químicas a escala piloto. La superficie del coque activado se caracteriza por mayor contenido de macroporos y mesoporos (con un rango entre 2 y 19nm) que el carbón activado, proporcionando mejores rendimientos de adsorción para contaminantes con moléculas grandes.

El tiempo de retención fijado para la remoción fue de 20 min. Para una remoción que alcanzara los límites establecidos en el artículo con un valor menor a 80 mg/L de DQO, se requirió una cantidad de coque activado de 0,609 g /L. La aplicación del coque activado en polvo es rentable como alternativa de tratamiento en aguas residuales para la remoción eficiente de DQO

[83]. Los dos artículos mencionados con respecto a la disminución de la Demanda Biológica de Oxígeno se debe a que es un parámetro que está por encima del límite máximo permisible como lo dictamina la Resolución 0631/2015 en cuanto a los vertimientos producto de las aguas termales utilizadas en el ITP.

Con base al trabajo de grado “Determinación de la cinética de adsorción de cloruros de vertimientos del sector agrícola cultivos energéticos, sobre carbón activado comercial.” de los autores Arroyo, L. D., & Ruíz, D. M., (2019), en donde se establece un modelo de pseudo-segundo orden para el proceso de adsorción de los iones cloruro por medio del carbón granulado comercial (CAG-LQ 900 S) [124], el cual tiene las características descritas en el Tabla 11.

Tabla 11.

Características fisicoquímicas del carbón activado (CAG)

Parámetro	CARBOCHEM LQ-900 S (CARBOCHEM INC.)
Precursor	Cáscara de coco
Activación	Física: CO ₂
Área superficial	864 m ² /g
Volumen del microporo	0,34 cm ³ /g
Basicidad total	742 um/g
pH	5,40
Tamaño de partícula	1,00 – 1,50 mm
Número de yodo	850 – 950 mg I/g
Densidad	50 – 500 g/L

Nota. En la tabla se observan las propiedades fisicoquímicas del CAG-LQ-900S. [En línea] Disponible en: <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acsomega.0c01288>

Debido a que en la literatura se reportan pocas o nulas investigaciones acerca de la adsorción de cloruros por medio de carbón activado, las autoras proponen basarse en investigaciones de componentes que sean similares a los cloruros, es por esto que los compuestos seleccionados son: 2-Nitrofenol, fenol, 2,4-Diclorofenol, O-clorofenol, P-clorofenol, flúor y yodo. El ion cloruro al poseer una alta electronegatividad del valor de 3,16, hace posible su comparación

con la electronegatividad del flúor que es de 3,99; además que estos dos compuestos presentan un estado de ionización de -1 identificándolos como altamente oxidantes [124].

En cuanto a los compuestos fenólicos como el orto clorofenol y el 2,4-diclorofenol son derivados clorados del fenol, se hace la comparación debido a la densidad entre el cloruro de sodio ($1,08 \text{ g/cm}^3$) y el fenol, y la densidad del 2-Nitrofenol es parecida a la densidad del cloruro de magnesio ($2,30 \text{ g/cm}^3$). Por último, el yodo se compara con el ion cloruro ya que al hacer parte del grupo 17 de los haluros, se caracterizan por tener energías de ionización mayores o iguales a 2,50 en la escala de Pauling, agregando que su radio promedio es de 115 ppm, casi igual al establecido para el cloro de 100 ppm [124].

Luego de realizar las similitudes y escoger el carbón activado más adecuado para la eliminación parcial de cloruros de las aguas residuales, se establecen las siguientes variables, un pH de 5, un tiempo de agitación de 20 horas, obteniendo una remoción de iones Cl^- en un rango de 813,05 mg/L hasta 487,83 mg/L, representando porcentajes de remoción del 87%, destacando que se presentan mejores rendimientos cuando hay mayor cantidad de cloruros en la muestra [124].

4.7. Aplicación a escala laboratorio del hueso bovino y el carbón mineral para la adsorción de cloruros y sulfatos

Según la bibliografía consultada acerca de las aplicaciones del hueso bovino para la adsorción de cloruros y sulfatos, se encontró un trabajo de grado titulado “EVALUACIÓN DE LA ADSORCIÓN DE PARTES ÓSEAS DE RES EN UN DISPOSITIVO DE FLUJO CONTINUO, PARA LA REMOCIÓN DE IONES DE CALCIO, MAGNESIO, ALUMINIO, HIERRO, SULFATO, CARBONATO Y CLORURO; A ESCALA DE LABORATORIO” [80], en el cual se realiza el paso a paso para llevar a cabo la evaluación. Por esto se tiene como referencia para hacer los ensayos en el laboratorio. A continuación, se explicará la secuencia que se determinó para realizar las prácticas de laboratorio, en primer lugar, desarrolló la determinación de cloruros y luego la de sulfatos.

4.7.1. Aplicación a escala laboratorio del hueso bovino y el carbón mineral para adsorción de iones cloruro

Para la cuantificación de cloruros en el agua sintética realizada se utilizó el Test Cloruros Spectroquant de la marca Merck. El método consiste en la reacción de los iones cloruro con el tiocianato de mercurio (II) dando como producto cloruro de mercurio (II) poco disociado. El tiocianato liberado forma con iones hierro (III) tiocianato de hierro (III), el cual se va a determinar fotométricamente [131].

4.7.1.i. Práctica de adsorción de cloruros con el hueso bovino y carbón mineral

4.7.1.i.a. Práctica de adsorción de cloruros con el hueso bovino

Métodos y procedimiento:

1. Se compraron dos huesos (fémur) de vaca, los cuales pesaron alrededor de 4 kg. Posteriormente se cortaron 23 partes similares para facilitar su limpieza, como se puede evidenciar en la Figura 34.

Figura 34.

Huesos de bovino cortados



Nota. En la figura se muestra el hueso (fémur) cortado en partes similares el cual fue utilizado para la práctica realizada. Elaboración Propia

2. Siguiendo el protocolo del trabajo de grado del autor Acevedo Murillo. Y (2011), se realizaron varios lavados con agua hervida para la remoción de grasas y sebo [120], donde pesaron 3236,1 g. Al no ser suficiente se realizaron nuevamente los lavados añadiendo ácido acético y bicarbonato de sodio, para facilitar la limpieza. Después de varios lavados los huesos quedaron como se puede apreciar en la Figura 35, con peso total de 2826,20 g.

Cabe resaltar que para este ensayo no se tuvo en cuenta la parte de la tróclea femoral debido a la cantidad de grasa que contiene, lo cual podría llegar a alterar los resultados.

Figura 35.

Huesos de bovino lavado y seleccionado para su uso

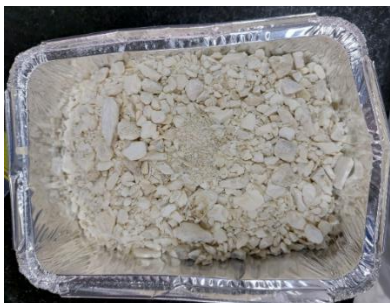


Nota. En la figura se muestra el hueso lavado sin trazas de carne, donde podemos identificar más claramente las partes en la imagen de la derecha la tróclea femoral y en la imagen de la izquierda la diáfisis o cuerpo.

3. Los huesos que hacen parte de la diáfisis o cuerpo, se molieron con un molino de martillos, para poder obtener una mejor área superficial la cual pueda interactuar con la solución de cloruro de sodio. Esta muestra seleccionada pesó 705,45 g como se muestra en la Figura 36, sin diámetro definido.

Figura 36.

Hueso Molido y pesado.



Nota. En la figura se muestra el hueso molido pesado y seleccionado para el posterior tratamiento de las aguas.

4. Se preparó el agua sintética que corresponde una solución de cloruro de sodio (NaCl) a una concentración de 490 mg Cl⁻/L. Para esto, se pesó en una balanza analítica 808 mg de NaCl analítico y se aforó con agua destilada en un balón aforado de 1000 mL.

5. En dos erlenmeyers de 100 mL se prepararon las siguientes dos muestras:

M1: 10 g de hueso con 20 ml de la solución de NaCl.

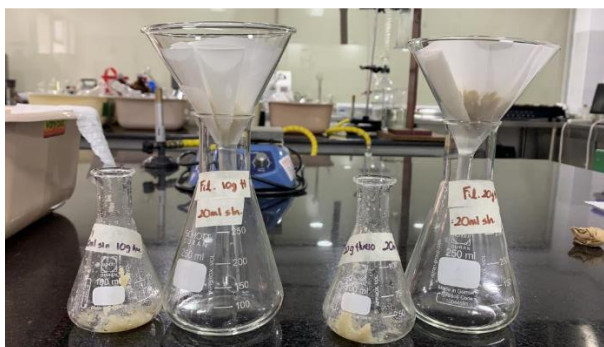
M2: 20 g de hueso con 20 ml de la solución de NaCl.

Se sellaron y se agitaron a una plancha de agitación marca BOECO MSH-300N en el nivel 3 por 24 horas.

6. Luego de terminada la agitación de las muestras, se procede a realizar la filtración con ayuda de otros erlenmeyers, embudos y papel filtro cuantitativo, como se puede evidenciar en la Figura 50, esto con el fin de realizar el test de cloruros con el agua de las dos muestras filtradas.

Figura 37.

Filtración de los huesos presentes en el agua



Nota. En la figura se muestra la filtración realizada para la separación de los huesos presentes en el agua.

7. Debido a que la concentración máxima leída por el espectrofotómetro es de 250 mg Cl⁻/L, las muestras de agua filtradas se deben diluir en una décima parte.
8. Para poder tener un dato base se determinó la cantidad de iones cloruro en la solución inicial de NaCl, la cual contenía 490 mg Cl⁻/L, por lo tanto, se realizó la misma dilución que en las muestras M1 y M2; esta solución se nombra como BM.
9. Se llevó a cabo la determinación de cloruros por medio de un kit de la marca Merck. El método utilizado es, 4500-Cl- E. Automated Ferricyanide Method. Para poder realizarlo se siguió el paso a paso descrito en el manual, algunos de los resultados obtenidos mediante el espectrofotómetro se muestran en la Figura 38.

Figura 38.

Equipo de espectrofotometría



Nota. En la figura se muestra el resultado de la proporción de 20 g de hueso y 20 ml de NaCl.

4.7.1.i.b. Práctica de adsorción de cloruros con carbón mineral

Métodos y procedimiento:

1. El carbón mineral procede de una mina de Paipa, Boyacá (Figura 39). Fue triturado en un molino de martillos tres veces sin uso de malla, para poder obtener un diámetro uniforme en toda la muestra. Se calculó el peso total de la muestra en una balanza analítica de 600 g marca Scout-Pro, con un valor de 1000,08 g.

Figura 39.

Carbón mineral



Nota. En la figura se muestra parte del carbón utilizado para las prácticas.

2. Se procedió a tamizar la muestra en una tamizadora eléctrica. La tamizadora se programó por 20 min para tamizar la muestra.

Se obtuvieron los siguientes resultados de cada una de las mallas:

Número de malla (um)	Retención (g)
Malla 600	275,22
Malla 300	294,92
Malla 170	326,42
Malla 150	N.A
Malla 53	49,31
Fondos	54,21

3. En dos Erlenmeyer de 100 mL se agregaron las siguientes relaciones de carbón mineral y solución del agua sintética, obteniendo dos muestras:

M3: 10 g de carbón mineral con 20 ml de la solución a analizar.

M4: 20 g de carbón mineral con 20 ml de la solución a analizar.

Se sellaron y se agitaron a una plancha de agitación marca BOECO MSH-300N en el nivel 3 por 24 horas.

4. Luego de terminada la agitación de las muestras, se procede a realizar una filtración al vacío con ayuda de dos matraces de kitasato, dos embudos Büchner, papel filtro cuantitativo y un sistema al vacío (bomba de succión y manguera), como se puede evidenciar en la Figura 40, esto con el fin de realizar la determinación de cloruros con el agua de las dos muestras filtradas.

Figura 40.

Filtro al vacío.



Nota. En la figura se muestra la filtración realizada mediante una conexión al sistema de vacío, en la imagen de la izquierda se observa para 10 g de carbón y 20 ml de solución y para la derecha se observa el de 20 g de carbón y 20 ml de solución.

5. Se llevó a cabo la determinación de cloruros por medio de un kit de la marca Merck. El método utilizado es, *4500-Cl- E. Automated Ferricyanide Method*.

4.7.1.i.c. Diseño de experimentos

Para realizar el diseño de experimentos se implementó la herramienta de análisis de varianza ANOVA (*ANALYSIS OF VARIANCE*, según su terminología en inglés). Este es un conjunto de técnicas estadísticas de gran utilidad. Se emplea cuando se necesitan comparar más de dos grupos, cuando los sujetos pueden variar en una o más características que afecten el resultado [132].

Diseño de experimentos para la adsorción de ion cloruro:

Diseño de experimentos para el hueso bovino:

El diseño de experimentos se realiza para observar el comportamiento de la adsorción de cloruros utilizando como medio el hueso bovino, este consta de dos niveles, un factor y diez réplicas por cada experimento dando como resultado un total de 20 datos finales representativos. La única variable a evaluar consiste en variar la masa de hueso bovino en gramos, en una solución de 20 mL de la solución de cloruro de sodio (NaCl), con valores de 10 g y 20 g, como se puede evidenciar en la Tabla 12.

Se calculó la desviación estándar (S) de cada una de las muestras con sus respectivas réplicas para determinar qué tan dispersos se encontraban los datos. Para la primera muestra (10 g de hueso bovino) y segunda muestra (20 g de hueso bovino), se obtuvo una S de 1,51 y 0,97 respectivamente, demostrando que los valores están menos dispersos alrededor de la media.

Tabla 12.

Datos utilizados en el diseño de experimentos para cloruros con el hueso bovino

		Masa del hueso bovino (g)			
		10	Desviación estándar	20	Desviación estándar
Volumen (mL)	20	140	1,51	127	0,97
		143		128	
		144		130	
		144		129	
		143		129	
		143		128	
		145		128	
		145		128	
		145		130	
		144		129	

Nota. Resultados obtenidos en el laboratorio variando el factor A (masa del hueso bovino en gramos)

Planteamiento de las hipótesis:

Hipótesis nula de la variable A:

No hay correlación entre la remoción de cloruros y la masa de hueso bovino utilizada en el proceso de adsorción.

$$H_0: \mu_1 + \mu_2 = \mu$$

Hipótesis alternativa de la variable A:

Existe correlación entre la remoción de cloruros y la masa de hueso bovino utilizada en el proceso de adsorción.

$$H_A: \mu_i \neq \mu_j$$

Para la elección del parámetro alfa (Tabla 13), se debe hacer un análisis del coeficiente de variación porcentual de los datos recolectados. Debido a que el %CV, tuvo un valor igual a 5% se toma un alfa de 5% ($\alpha=0,05$).

Tabla 13.

Parámetros para determinar el coeficiente de variación para cloruros con el hueso bovino

Promedio (μ)	136,10
Desviación estándar (S)	7,79
% Coeficiente de variación (CV)	5,73

Nota. Cálculos realizados con la herramienta Microsoft EXCEL

El coeficiente de variación está dentro del rango entre 0 y 1, al ser de un valor de 0,05 y estar más cerca al 0. Se considera que existe poca variabilidad entre los datos recolectados y es una muestra compacta.

Tabla 14.

Análisis de varianza de un factor para cloruros con el hueso bovino

RESUMEN

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Columna 1	10,00	1436,00	143,60	2,27
Columna 2	10,00	1286,00	128,60	0,93

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	1125,00	1,00	1125,00	703,13	7,06E-16	4,41
Dentro de los grupos	28,80	18,00	1,60			
Total	1153,80	19,00				

Nota. Cálculos realizados con la herramienta Microsoft EXCEL. $F_0=F$, hace referencia al estadístico de prueba.

Para el análisis del ANOVA, fue necesario realizar los cálculos que se encuentran en la Tabla 14. Según la ecuación 3, no hay evidencia significativamente estadística para aceptar la H_0

debido a que la remoción de cloruros fue directamente proporcional a la masa de hueso bovino utilizada.

Ecuación 3.

Estadístico de prueba

$$F_0 > F_{Tabla\ fisher}; se\ rechaza\ H_0$$

Diseño de experimentos para el carbón mineral:

El diseño de experimentos se realiza para observar el comportamiento de la adsorción de cloruros utilizando como medio el carbón mineral, este consta de dos niveles, un factor y diez réplicas por cada experimento dando como resultado un total de 20 datos finales representativos. La única variable a evaluar consiste en variar la masa de carbón mineral en gramos, en una solución de 20 mL de la solución de cloruro de sodio (NaCl), con valores de 10 g y 20 g, como se puede evidenciar en la Tabla 15.

Se calculó la desviación estándar (S) de cada una de las muestras con sus respectivas réplicas, obteniendo un valor de 1,17 y 1,23 para los dos tratamientos (10 g y 20 g de carbón mineral), respectivamente. Determinando que tiene el mismo comportamiento de poca dispersión como el que se presenta en el diseño de experimentos para el hueso bovino.

Tabla 15.

Datos utilizados en el diseño de experimentos para cloruros con el carbón mineral

		Masa del carbón mineral (g)			
		10	Desviación estándar	20	Desviación estándar
Volumen (mL)	20	149	1,17	152	1,23
		149		151	
		148		151	
		149		151	
		148		152	
		146		155	
		147		153	
		146		152	
		147		153	
		147		152	

Nota. Resultados obtenidos en el laboratorio variando el factor A (masa del carbón mineral en gramos)

Planteamiento de las hipótesis:

Hipótesis nula de la variable A:

No hay correlación entre la remoción de cloruros y la masa de carbón mineral utilizada en el proceso de adsorción.

$$H_0: \mu_1 + \mu_2 = \mu$$

Hipótesis alternativa de la variable A:

Existe correlación entre la remoción de cloruros y la masa de carbón mineral utilizada en el proceso de adsorción.

$$H_A: \mu_i \neq \mu_j$$

Para la elección del parámetro alfa (Tabla 16), se debe hacer un análisis del coeficiente de variación porcentual de los datos recolectados. Debido a que el %CV < 5% se debe tomar un nivel de significancia del 1% ($\alpha=0,01$).

Tabla 16.

Parámetros para determinar el coeficiente de variación para cloruros con el carbón mineral

Promedio (μ)	149,90
Desviación estándar (S)	2,63
% Coeficiente de variación (CV)	1,76

Nota. Cálculos realizados con la herramienta Microsoft EXCEL

El coeficiente de variación está dentro del rango entre 0 y 1, al ser de un valor de 0,02 y estar más cerca al 0. Se considera que existe poca variabilidad entre los datos recolectados y es una muestra compacta.

Tabla 17.

Análisis de varianza de un factor para cloruros con el carbón mineral

RESUMEN

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Columna 1	10,00	1476,00	147,60	1,38
Columna 2	10,00	1522,00	152,20	1,51

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	105,80	1,00	105,80	73,25	9,25E-08	4,41
Dentro de los grupos	26,00	18,00	1,44			
Total	131,80	19,00				

Nota. Cálculos realizados con la herramienta Microsoft EXCEL. $F_0=F$, hace referencia al estadístico de prueba.

Para el análisis del ANOVA, fue necesario realizar los cálculos que se encuentran en la Tabla 17. Según la ecuación 3, no hay evidencia significativamente estadística para aceptar la H_0 debido a que la remoción de cloruros fue inversamente proporcional a la masa de carbón mineral utilizada.

4.7.1. ii. Resultados del método 4500-Cl- E. Automated Ferricyanide Method para las muestras que contenían hueso bovino

Se realizó el análisis del test de cloruros, para esto se prepararon las muestras según el manual. Para el BM solo se preparó una muestra, a la muestra M1 se le realizó duplicado y la muestra M2 triplicado, cada una de ellas se midió cinco veces en el espectrofotómetro con la finalidad de obtener valores constantes y con estos calcular la media de los resultados (Tabla 18).

Tabla 18.

Resultados del método 4500-Cl- E. Automated Ferricyanide Method para el estudio en hueso bovino.

Muestra	No. Réplicas	Concentración (mg Cl/L)	Muestra	No. Réplicas	Concentración (mg Cl/L)
BM	1	161	M2	1	127
		163			128
		162			130
		163			129
		163			129
	Promedio	162,4		Promedio	128,6
M1	1	140		2	123
		143			123
		144			126
		144			125
		143			125
	Promedio	142,8	Promedio	124,4	
	2	143	3	128	
		145		128	
		145		128	
		145		130	
		144		129	
Promedio	144,4	Promedio	128,6		

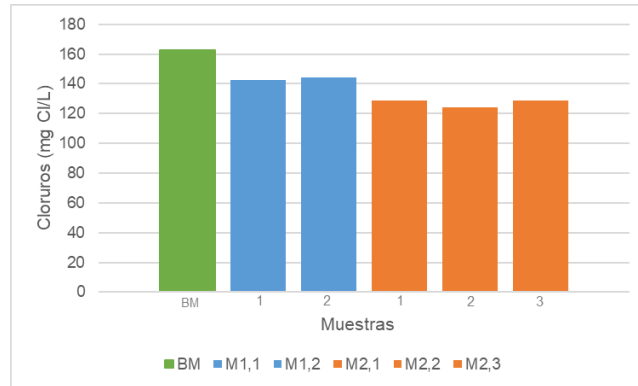
Nota. En la tabla se muestran los resultados obtenidos mediante el método 4500-Cl- E. Automated Ferricyanide Method, para las muestras BM, M1 y M2.

Análisis de resultados.

De acuerdo a los resultados obtenidos se realizó un gráfico de barras donde se observa la media de las muestras realizadas, como se evidencia en la Figura 41.

Figura 41.

Gráfica de resultados del método *4500-Cl- E. Automated Ferricyanide Method*, para hueso bovino



Nota. BM= blanco de muestra (490 mg Cl-/L); M1,1 y M1,2= relación 1:2 (10 g de hueso bovino y 20 mL NaCl); M1,1; M1,2 y M1,3= relación 1:1 (20 g de hueso bovino y 20 mL NaCl).

Se puede observar que la muestra M2, que tiene una relación de 20 g de hueso con 20 mL de la solución de NaCl, logra una remoción hasta obtener una concentración de 124,40 mg Cl-/L luego de que el hueso bovino permaneciera en contacto mediante agitación por un periodo de tiempo de 24 horas con el agua base preparada anteriormente. La remoción de cloruros más deficiente se presentó en la muestra M1, con una relación de 10 g de hueso con 20 mL de la solución de NaCl, obteniéndose una concentración final de 144,40 mg Cl-/L.

Debido a que los resultados obtenidos por el espectrofotómetro se realizaron en las muestras diluidas a una décima parte, para identificar el valor real cada una de las lecturas se multiplica por 10, de acuerdo a la ecuación 4 para hallar concentraciones de todas las muestras realizadas.

Ecuación 4.

Ecuación de dilución

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

La media de la concentración inicial del ion cloruro en la solución sin la adición de hueso (BM) fue de 1624 mg Cl-/L, por lo tanto, el porcentaje de remoción del hueso bovino con respecto

a M1 y a M2 fue de 11,33% y 20,81% respectivamente, identificando una mayor remoción en la muestra M2, por lo tanto, es posible realizar una relación entre la cantidad de hueso utilizado y el porcentaje de remoción de ion cloruro, siendo directamente proporcionales.

4.7.1.iii. Resultados del método *4500-Cl- E. Automated Ferricyanide Method* para las muestras que contenían carbón mineral

Se realizó el análisis del test de cloruros, para esto se preparó la muestra según el manual y se hicieron duplicados por cada muestra, cada una de ellas se midió cinco veces en el espectrofotómetro con la finalidad de obtener valores constantes y con estos calcular la media de los resultados (Tabla 19).

Tabla 19.

Resultados del método *4500-Cl- E. Automated Ferricyanide Method*, para el estudio en carbón mineral

Muestra	No. Réplicas	Concentración (mg Cl/L)	Muestra	No. Réplicas	Concentración (mg Cl/L)
BM	1	161	M4	1	152
		163			151
		162			151
		163			151
		163			152
	Promedio	162,4		Promedio	151,4
M3	1	149	2	155	
		149		153	
		148		152	
		149		153	
		148		152	
	Promedio	148,6	Promedio	153	
	2	146			
		147			
		146			
		147			
147					
Promedio	146,6				

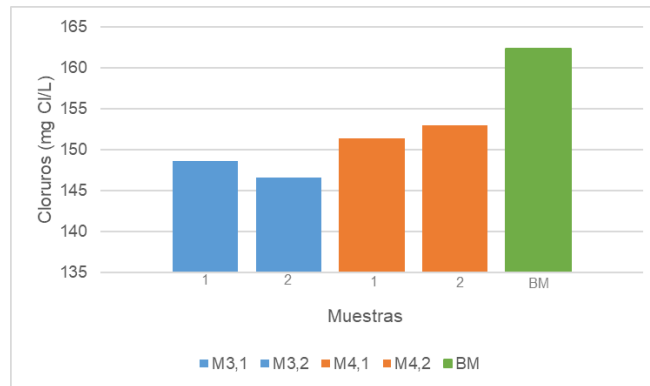
Nota. En la tabla se muestran los resultados obtenidos mediante el método *4500-Cl- E. Automated Ferricyanide Method*.

Análisis de resultados.

De acuerdo a los resultados obtenidos se realizó un gráfico de barras donde se observa la media de cada una de las dos muestras (M3 y M4) realizadas y el BM, como se evidencia en la Figura 42.

Figura 42.

Gráfica de resultados del método 4500-Cl- E. Automated Ferricyanide Method, para Carbón mineral



Nota. BM= blanco de muestra (490 mg Cl-/L); M3,1 y M3,2 relación 1:2 (10 g de carbón mineral y 20 mL NaCl); M4,1 y M4,2 relación 1:1 (20 g de carbón mineral y 20 mL NaCl).

Se puede observar que la muestra M3, que tiene una relación de 10 g de carbón mineral con 20 mL de la solución de NaCl, se logra una remoción hasta una concentración de iones cloruro de 146,60 mg Cl⁻/L luego de que el carbón estuviera en contacto mediante agitación por un periodo de 24 horas con el agua sintética realizada en el laboratorio previamente. La adsorción más deficiente para este caso se presentó en la muestra M4, con una de 20 g de carbón mineral con 20 mL de la solución de NaCl, con un resultado de concentración de 153,00 mg Cl⁻/L.

Como se mencionó anteriormente, los resultados obtenidos por el espectrofotómetro se realizaron en las muestras diluidas, se debe hacer uso de la ecuación 4, para poder determinar la concentración real de todas las muestras.

El porcentaje de remoción de las muestras M3 y M4 con respecto a la muestra BM, fue de 9,73% y 5,79% respectivamente. En el caso del carbón mineral como medio adsorbente, la relación entre la cantidad de carbón y el porcentaje de remoción del ion cloruro no es directamente proporcional. Este resultado se relaciona con el área superficial del carbón, la cual está compuesta en su mayoría por macro y meso poros, siendo el ion cloruro una molécula muy pequeña que el carbón no alcanza a adsorber, este en cambio, tiene mayores eficiencias de remoción en moléculas grandes, como por ejemplo la de DQO.

Cabe aclarar que la concentración inicial de la solución era de 490 mg Cl⁻/L, valor que no se reportó al realizar la lectura en el espectrofotómetro, registrando una lectura de 1624 mg Cl⁻/L

presentándose una gran variación entre ambos valores. Una de las posibles causas de esto se debe a fallas e inconsistencias del equipo, por lo tanto, el porcentaje de remoción que se presenta puede contener errores, debido al espectrofotómetro.

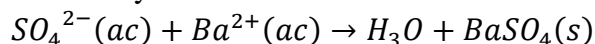
4.7.2. Aplicación a escala laboratorio del hueso bovino para adsorción de iones sulfato

Para la determinación de sulfatos en el agua sintética (solución de Na_2SO_4), se llevó a cabo la práctica de laboratorio de la materia de química industrial inorgánica experimental, código 0320, del programa de ingeniería química de la Fundación Universidad de América. Esta se realiza por medio del método de turbidimetría.

El principio del método consiste en que el ion sulfato se precipite en forma coloidal en un medio acético con cloruro de bario, de esta manera se forman cristales de sulfato de bario, la siguiente reacción se representa con la ecuación 5:

Ecuación 5.

Ion sulfato y el cloruro de bario en medio acético



Nota. La presente ecuación muestra la fórmula entre el ion sulfato y el cloruro de bario en un medio acético. Tomado de Guías prácticas de laboratorio de la materia química industrial inorgánica experimental del programa ingeniería química, Fundación universidad de América.

4.7.2.i. Práctica de adsorción de sulfatos con el hueso bovino y carbón mineral

4.7.2.i.a. Práctica de adsorción de cloruros con el hueso de bovino

Métodos y procedimiento:

1. Se preparó el agua sintética que corresponde una solución de sulfato de sodio (Na_2SO_4) a una concentración de 570 mg SO_4^{2-} /L. Para esto, se pesó en una balanza analítica 842,83 mg de Na_2SO_4 anhidro y se aforó con agua destilada en un balón aforado de 500 mL.
2. En tres erlenmeyer de 250 mL se agregaron las siguientes relaciones de hueso y agua sintética obteniendo 3 muestras:

M1: 5 g de hueso con 50 ml de la solución de Na_2SO_4 .

M2: 20 g de hueso con 40 ml de la solución de Na_2SO_4 .

M3: 40 g de hueso con 40 ml de la solución de Na_2SO_4 .

Se sellaron y se agitaron a un shaker marca Benchmarck por 24 horas.

3. Luego de terminada la agitación de las muestras, se procede a realizar la filtración con ayuda de otros tres Erlenmeyer, tres embudos y tres papel filtro cuantitativo, como se puede evidenciar en la Figura 43.

Figura 43.

Filtración del hueso a diferentes concentraciones.



Nota. En la figura se muestra la filtración de los huesos en 3 Erlenmeyer de 250 cada uno con una proporción diferente de hueso.

4. Se realizó la prueba de turbidimetría siguiendo los pasos consignados en la guía de laboratorio de química industrial inorgánica experimental, código 0320 de la Fundación Universidad de América.

4.7.2.i.b. Práctica de adsorción de sulfatos con carbón mineral

Se realiza el mismo procedimiento que se siguió para la determinación de sulfatos con el hueso bovino. Las muestras para esta práctica son:

M4: 5 g carbón mineral con 50 mL Na_2SO_4 .

M5: 20 g carbón mineral con 40 mL Na_2SO_4 .

M6: 40 g carbón mineral con 40 mL Na_2SO_4 .

La filtración de las muestras se realizó con tres Erlenmeyer, tres embudos y tres papel filtro cuantitativo para la determinación de la adsorción en cada muestra cómo se puede observar en la Figura 44.

Figura 44.

Filtración del carbón a diferentes concentraciones.



Nota. En la figura se muestra la filtración de los huesos en 3 Erlenmeyer de 250 cada uno con una proporción diferente de carbón.

Se realizaron los mismos pasos que se muestran en la determinación de sulfatos en las muestras que contenían hueso bovino.

4.7.2.i.c. Diseño de experimentos para la adsorción de ion sulfato

Diseño de experimentos para el hueso bovino:

El diseño de experimentos se realiza para observar el comportamiento de la adsorción de sulfatos utilizando como medio el hueso bovino, este consta de tres niveles, un factor y cinco réplicas por cada experimento dando como resultado un total de 15 datos finales representativos. La única variable a evaluar consiste en variar la masa de hueso bovino en gramos, en una solución de 40 mL de la solución de sulfato de sodio (Na_2SO_4), con valores de 4 g, 20 g y 40 g, como se puede evidenciar en la Tabla 20.

Se calculó la desviación estándar (S) de cada una de las muestras con sus respectivas réplicas, obteniendo un valor de 0,65; 0,41; y 0,42 para los tres tratamientos (4 g, 20 g y 40 g de hueso bovino), respectivamente. Determinando que presentan una menor dispersión en relación con los valores obtenidos en el diseño de experimentos para los cloruros.

Tabla 20.

Datos utilizados en el diseño de experimentos para sulfatos con el hueso bovino

		Masa del hueso bovino (g)					
		4	Desviación estándar	20	Desviación estándar	40	Desviación estándar
Volumen (mL)	40	34,30	0,65	16,36	0,41	9,56	0,42
		33,20		16,65		9,20	
		33,28		17,20		8,88	
		33,93		16,12		9,89	
		32,65		16,77		9,77	

Nota. Resultados obtenidos en el laboratorio variando el factor A (masa del hueso bovino en gramos)

Planteamiento de las hipótesis:

Hipótesis nula de la variable A:

No hay correlación entre la remoción de sulfatos y la masa de hueso bovino utilizada en el proceso de adsorción.

$$H_0: \mu_1 + \mu_2 + \mu_3 = \mu$$

Hipótesis alternativa de la variable A:

Existe correlación entre la remoción de sulfatos y la masa de hueso bovino utilizada en el proceso de adsorción.

$$H_A: \mu_i \neq \mu_j$$

Para la elección del parámetro alfa (Tabla 21), se debe hacer un análisis del coeficiente de variación porcentual de los datos recolectados. Debido a que el %CV < 10%, se toma un alfa de 10% ($\alpha=0,1$).

Tabla 21.

Parámetros para determinar el coeficiente de variación para sulfatos con el hueso bovino

Promedio (μ)	19,85
Desviación estándar (S)	10,43
% Coeficiente de variación (CV)	52,55

Nota. Cálculos realizados con la herramienta Microsoft EXCEL

El coeficiente de variación está dentro del rango entre 0 y 1, al ser de un valor de 0,52 y estar más cerca al 1. Se considera que existe que la media de todos los datos recolectados en conjunto es poco representativa.

Tabla 22.

Análisis de varianza de un factor para sulfatos con el hueso bovino

RESUMEN

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Columna 1	5,00	167,36	33,47	0,42
Columna 2	5,00	83,10	16,62	0,17
Columna 3	5,00	47,29	9,46	0,17

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	1519,99	2,00	760,00	2979,32	6,59E-17	3,89
Dentro de los grupos	3,06	12,00	0,26			
Total	1523,06	14,00				

Nota. Cálculos realizados con la herramienta Microsoft EXCEL. $F_0=F$, hace referencia al estadístico de prueba.

Para el análisis del ANOVA, fue necesario realizar los cálculos que se encuentran en la Tabla 22. Según la ecuación 3, no hay evidencia significativamente estadística para aceptar la H_0 debido a que la remoción de sulfatos fue directamente proporcional a la masa de hueso bovino utilizada.

Diseño de experimentos para el carbón mineral:

El diseño de experimentos se realiza para observar el comportamiento de la adsorción de cloruros utilizando como medio el carbón mineral, este consta de tres niveles, un factor y cinco réplicas por cada experimento dando como resultado un total de 15 datos finales representativos. La única variable a evaluar consiste en variar la masa de carbón mineral en gramos, en una solución de 40 mL de la solución de sulfato de sodio (Na_2SO_4), con valores de 4 g, 20 g y 40 g, como se puede evidenciar en la Tabla 23.

Se determinó la desviación estándar (S) de cada una de las muestras con sus respectivas réplicas, obteniendo un valor de 0,21; 0,47; y 0,38 para los tres tratamientos (4 g, 20 g y 40 g de

carbón mineral), respectivamente. Determinando que presentan el mismo comportamiento de poca dispersión que el diseño de experimentos anterior.

Tabla 23.

Datos utilizados en el diseño de experimentos para sulfatos con el carbón mineral

		Masa del carbón mineral (g)					
		4	Desviación estándar	20	Desviación estándar	40	Desviación estándar
Volumen (mL)	40	38,72	0,21	36,79	0,47	35,07	0,38
		39,28		36,12		35,17	
		39,07		36,76		34,74	
		39,11		37,13		34,40	
		38,91		36,05		35,37	

Nota. Resultados obtenidos en el laboratorio variando el factor A (masa del carbón mineral en gramos)

Planteamiento de las hipótesis:

Hipótesis nula de la variable A:

No hay correlación entre la remoción de sulfatos y la masa de carbón mineral utilizada en el proceso de adsorción.

$$H_0: \mu_1 + \mu_2 + \mu_3 = \mu$$

Hipótesis alternativa de la variable A:

Existe correlación entre la remoción de sulfatos y la masa de carbón mineral utilizada en el proceso de adsorción.

$$H_A: \mu_i \neq \mu_j$$

Para la elección del parámetro alfa (Tabla 24), se debe hacer un análisis del coeficiente de variación porcentual de los datos recolectados. Debido a que el %CV < 5% se debe tomar un nivel de significancia del 1% ($\alpha=0,01$).

Tabla 24.

Parámetros para determinar el coeficiente de variación

Promedio (μ)	36,85
Desviación estándar (S)	1,77
% Coeficiente de variación (CV)	4,79

Nota. Cálculos realizados con la herramienta Microsoft EXCEL

El coeficiente de variación está dentro del rango entre 0 y 1, al ser de un valor de 0,04 y estar más cerca al 0. Se considera que existe poca variabilidad entre los datos recolectados y es una muestra compacta.

Tabla 25.

Análisis de varianza de un factor para sulfatos con el carbón mineral

RESUMEN

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Columna 1	5,00	195,10	39,02	0,05
Columna 2	5,00	182,84	36,57	0,22
Columna 3	5,00	174,75	34,95	0,15

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	41,98	2,00	20,99	153,39	2,85E-09	3,89
Dentro de los grupos	1,64	12,00	0,14			
Total	43,62	14,00				

Nota. Cálculos realizados con la herramienta Microsoft EXCEL. $F_0=F$, hace referencia al estadístico de prueba.

Para el análisis del ANOVA, fue necesario realizar los cálculos que se encuentran en la Tabla 27. Según la ecuación 3, no hay evidencia significativamente estadística para aceptar la H_0 debido a que la remoción de sulfatos fue directamente proporcional a la masa de carbón mineral.

4.7.2. Resultados y análisis de la prueba de turbidimetría para la determinación de sulfatos para las muestras que contenían hueso bovino y carbón mineral

Para la determinación de sulfatos, se realizó por medio del método de turbidimetría y por cada muestra evaluada se realizaron de a cuatro a cinco lecturas en el turbidímetro de acuerdo a la variación de los resultados arrojados por el equipo, cabe mencionar que el equipo presenta posibles fallas evidenciadas en los valores obtenidos.

Para poder obtener la ecuación de la recta, se calculó la curva de calibración con los seis patrones preparados en el laboratorio, se realizan cinco lecturas por cada patrón y se halla la media de los valores, ver Tabla 26.

Tabla 26.

Lecturas por patrón con su respectiva media de la turbidez (NTU)

Patrón	Media de la Turbidez (NTU)
5	10,72
10	15,79
15	29,54
20	51,42
25	64,01
50	144,23

Nota. En la tabla se muestran cinco patrones con su respectiva media de la turbidez debido a que a cada uno de estos se les realizó de a cuatro a cinco tomas para una mejor exactitud. Elaboración propia.

A partir de la turbidez de los patrones en función de la concentración se obtiene la curva de calibración (Figura 45), en donde se puede evidenciar el valor de $R^2=0,9924$ y la función de la recta $y=mx+b$, demostrando que la ley de Lambert-Beer es lineal. Esta ley establece:

«que la absorbancia está directamente relacionada con las propiedades intrínsecas del analito, con su concentración y con la longitud de la trayectoria del haz de radiación al atravesar la muestra. La expresión matemática de la ley de Lambert-Beer es:» [133]

Ecuación 6.

Ley de Lambert-Beer

$$A = C * \epsilon * L$$

Donde:

A= absorbancia de la muestra.

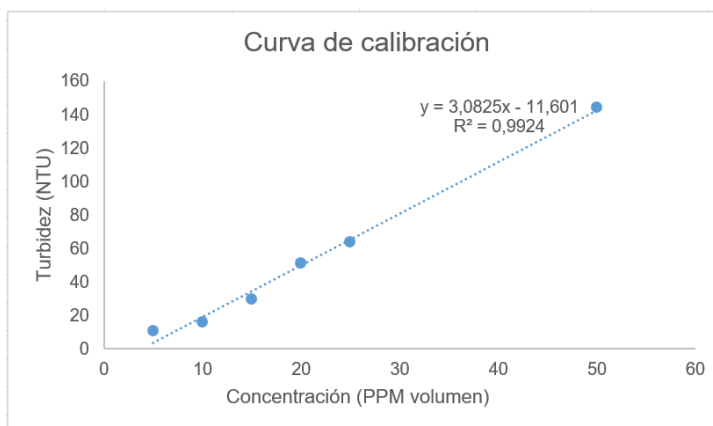
C= concentración del cromóforo.

L= longitud del paso óptico que contiene la muestra.

ϵ = Absorptividad molar. Depende del cromóforo en sí mismo, de la λ y de las condiciones de medida (pH, temperatura, entre otros). Ya que la absorbancia es adimensional las unidades son concentración-1 longitud-1.

Figura 45.

Curva de calibración



Nota. En la figura se muestra la curva de calibración como resultado de los valores tomados en el laboratorio, donde se compara la turbidez (NUT) contra la concentración en PPM volumen. Elaboración propia.

Para hallar las concentraciones de cada una de las seis muestras analizadas, se utiliza la ecuación de la recta, la cual se obtiene de la curva de calibración (Figura 45):

Ecuación 7.

Ecuación de la recta

$$y = 3,0825x - 11,601$$

Donde “y” representa la turbidez y “x” es la concentración de ion SO_4^{2-} de cada una de las muestras, obteniendo los resultados de la Tabla 27.

Tabla 27.

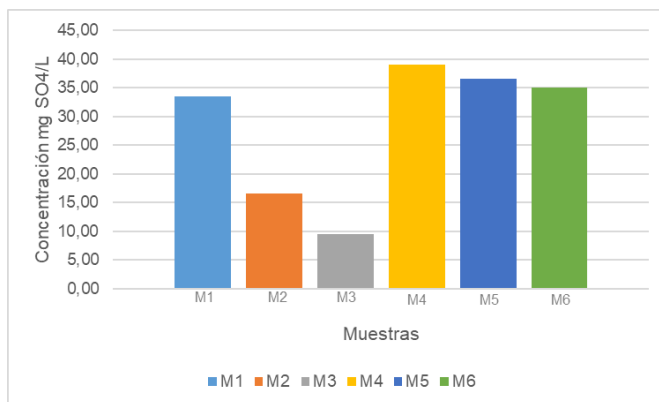
Lectura de turbidez de las 6 muestras

No. Muestra	Lecturas				
M1	34,30	33,20	33,28	33,93	32,65
M2	16,36	16,65	17,20	16,12	16,77
M3	9,56	9,20	8,88	9,89	9,77
M4	38,72	39,28	39,07	39,11	38,91
M5	36,79	36,12	36,76	37,13	36,05
M6	35,07	35,17	34,74	34,40	35,37

Nota. La tabla muestra las lecturas que se le tomaron a cada una de las muestras las cuales fueron tenidas en cuenta para la práctica de laboratorio. Elaboración propia.

Figura 46.

Gráfica de concentración del ion sulfato en cada una de las muestras



Nota. M1, relación 1:10 (5 g de hueso bovino y 50 mL de Na_2SO_4); M2, relación 1:2 (20 g de hueso bovino y 40 mL de Na_2SO_4); M3, relación 1:1 (40 g de hueso bovino y 40 mL de Na_2SO_4); M4, relación 1:10 (5 g de carbón mineral y 50 mL de Na_2SO_4); M5, relación 1:2 (20 g de carbón mineral y 40 mL de Na_2SO_4); y M6, relación 1:1 (40 g de carbón mineral y 40 mL de Na_2SO_4).

Debido a que se hicieron diluciones a la décima parte en cada una de las muestras, para poder saber la cantidad de iones sulfato real de la muestra analizada, se multiplica cada resultado por 10 aplicando la ecuación 4, que se usa para hallar diluciones. Por lo tanto, la concentración

mínima de ion sulfato registrada se presenta en la muestra M3, la cual estaba constituida por 40 g de hueso bovino y 40 mL de agua sintética de la solución de Na_2SO_4 , con un valor de 88,76 $\text{SO}_4^{2-}/\text{L}$. Mientras que, para el carbón mineral, el valor más pequeño se presentó en la muestra M6, la cual contenía 40 g de carbón mineral y 40 mL del agua sintética, con un valor de 344,01 mg $\text{SO}_4^{2-}/\text{L}$. Esto quiere decir que los medios adsorbentes presentan una significativa acción de remoción del ion sulfato en un 84,43% y 39,65%, para el hueso bovino y el carbón mineral, respectivamente.

Según la Figura 46, la mayor remoción de sulfatos se presentó utilizando el hueso bovino como medio adsorbente cuando este se encontraba en una relación de 40 g de hueso con 40 mL del agua sintética, y la remoción menos eficiente se presentó utilizando carbón mineral con relación a todas las muestras analizadas, pero la de menor porcentaje fue M4 con una composición de 5 g carbón y 50 mL del agua sintética.

4.8. Posible implementación de potenciales medios adsorbentes no convencionales al secuenciamiento de pretratamiento y tratamiento para la remoción de contaminantes provenientes de los vertimientos de las aguas termominerales del ITP

De acuerdo al secuenciamiento seleccionado por medio de matrices, la unidad para el pretratamiento consiste en la implementación de un filtro compuesto por pasto seco, cascarilla de arroz y aserrín, los cuales ayudaran a la remoción de sólidos suspendidos, grasas y posibles coliformes que presenten las aguas termominerales vertidas, seguido de un tratamiento donde la unidad de separación es una columna de intercambio iónico para remover los iones cloruro y sulfato siendo los parámetros que se encuentran en mayor proporción excediendo los valores límites permisibles por la Resolución 0631/2015.

Para este secuenciamiento se propone añadir el uso de medios no convencionales como la implementación de potenciales medios adsorbentes como el hueso de bovino y el carbón mineral, ya que al realizarse pruebas a nivel laboratorio con aguas sintéticas, se obtienen resultados favorables en cuanto a la disminución de la concentración de cloruros y sulfatos, presentándose una mayor viabilidad para la remoción del ion sulfato. Esta posible aplicación puede disminuir

costos con respecto a la cantidad de resina necesaria para el tratamiento, debido a que las aguas termominerales llegarían a esta unidad con una menor carga de sales.

Convirtiéndose en una opción más viable debido a la gran disponibilidad de este recurso natural (carbón mineral) y residuos agropecuarios (hueso de bovino) dentro de la Provincia de Tundama del departamento de Boyacá, y por los bajos costos que representan la utilización de cada uno de ellos, generando un valor agregado o segundo uso, incentivando el aprovechamiento de estos.

CONCLUSIONES

Por medio de revisiones bibliográficas y una campaña de muestreo realizada el presente año, se pudieron caracterizar las aguas termominerales del ITP como cloruradas y sulfatadas debido a que contienen más 1000 mg/L de cada una de las sales, además en cuanto a su pH se clasifican dentro del rango de neutras a ligeramente ácidas con un valor máximo de 7,47; por último se tuvo en cuenta la temperatura captada en cada uno de los puntos de muestreo y la bibliografía, encasillándolas dentro del grupo de aguas hipertermales al presentar en el Pozo Azul temperaturas mayores a 45 °C. En cuanto a los valores y rangos máximos permisibles en el Resolución 0631/2015, los cloruros, sulfatos y DQO, exceden el rango en un 2245,92%, 1715,76% y 260,67% respectivamente.

Al identificar las principales actividades de la provincia de Tundama y sus residuos agropecuarios, así como también los recursos naturales disponibles. Se selecciona el residuo de hueso de bovino de las plantas de beneficio y el carbón mineral debido a las actividades mineras de la región; y su relación con el potencial de adsorción de diferentes contaminantes, entre ellos, remoción de cloruros, sulfatos, DQO y DBO. Al implementarse estos dos medios a escala laboratorio, se obtuvo una remoción máxima de cloruros y sulfatos de 20,81% y 84,43% respectivamente para el hueso bovino; y para el carbón mineral un porcentaje de 9,73 para el ion Cl⁻ y de 39,65 para el ion SO₄. Considerándose el hueso bovino como el mejor adsorbente sin un tratamiento previo.

Para la determinación del secuenciamiento de unidades de separación, se elaboraron matrices de selección donde se evaluaron diferentes criterios. Se obtuvo como primer tratamiento un filtro compuesto de pasto seco, cascarilla de arroz y aserrín. Como segundo tratamiento, la implementación de una columna de intercambio iónico que utiliza una resina aniónica de base débil, ya que se pueden obtener remociones del 99% para cloruros y del 94% para sulfatos, cumpliendo con los requerimientos de la Resolución 0631/2015. Se propone a esta secuencia la adición de medios adsorbentes no convencionales como el hueso bovino y el carbón mineral previo a la columna de intercambio con el fin disminuir la cantidad de sales de las aguas termonerales del ITP a esta unidad de separación.

RECOMENDACIONES

Implementar en una escala real el filtro propuesto compuesto de pasto seco, cascarilla de arroz y aserrín, para evaluar la descomposición de los biomateriales y la representación del costo a nivel operativo, con respecto a la frecuencia de cambio.

Para la evaluación del potencial de adsorción del hueso de bovino para la remoción del ion cloruro y sulfato, se recomienda hacer un diseño de experimentos más detallado, donde se puedan evaluar diferentes variables como el tamaño de partícula, proporciones, composición química del hueso, tiempos de residencia, entre otras. Para lograr determinar las mejores condiciones de una adsorción eficiente de iones y otros contaminantes.

Buscar alternativas de activación para el carbón mineral, ya sean físicas y/o químicas para lograr obtener mayores resultados de adsorción al cambiar el área superficial y su comportamiento al entrar en contacto con diferentes contaminantes como cloruros, sulfatos y DQO, en vertimientos de aguas provenientes de actividades termales.

Añadir al secuenciamiento de unidades de separación un método de remoción de la Demanda Química de Oxígeno, con el objetivo de entregar el agua a las resinas de intercambio iónico únicamente con iones cloruro y sulfato, para mejorar la eficiencia de adsorción de sales. Así como también cumpliendo con los parámetros consignados en la Resolución 0631 de 2015.

Realizar las pruebas de laboratorio de remoción de iones cloruro y sulfato, con las aguas de los vertimientos provenientes de la actividad termal del Instituto de Turismo de Paipa, para poder observar y analizar el comportamiento real de los medios adsorbentes evaluados en aguas de característica termomineral.

Llevar a cabo de manera experimental la propuesta de secuenciamiento seleccionada para verificar su eficiencia en la remoción de los contaminantes planteados.

Proponer un modelo de economía circular donde se recuperen la gran cantidad de sales que contienen las aguas provenientes del Pozo Azul, generando un valor agregado otorgando un beneficio económico al ITP.

Se recomienda realizar estudios más detallados acerca de la capacidad de adsorción de iones sulfato y cloruros a partir del hueso de bovino, ya que las investigaciones sobre el tema son mínimas o casi nulas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. I. Pinuaga Espejel, “INFRAESTRUCTURA HIDROTERMAL”, Madrid, España. [PDF]. Disponible en: http://aguas.igme.es/igme/publica/pdfjor_aguas_mine/3_infraestructura.pdf. [Acceso: octubre 24, 2021]
- [2] E. Rojas Martínez, M. Fortich Duarte, y H. Pavajeau Maestre, “Determinación del origen y la composición de las aguas termales ubicadas en los municipios de Becerril (Cesar) y Ciénaga (Magdalena), Colombia”, *Ingenium*, vol. 8, no. 21, pp. 41, sep. 2014. [En línea]. Disponible: <https://repository.usc.edu.co/bitstream/handle/20.500.12421/759/DETERM~1.PDF?sequence=1&isAllowed=y> [Acceso: octubre 25, 2021].
- [3] P. V. Acevedo Buitrago y M. A. Cely Vargas, “Propuesta para la disminución de contaminantes en las aguas residuales provenientes de las piscinas termales del instituto de turismo de Paipa.” Trabajo de grado, Fundación Universidad de América, 2020 [En línea]. Disponible en: <http://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/8110> [Acceso: octubre 25, 2021]
- [4] USOCHICAMOCHA. (s.f). “Visión y Misión”. [En línea]. Disponible en: <https://usochicamocha.com.co/mision-y-vision/>. [Acceso: octubre 31, 2021]
- [5] S. Szklarek, A. Górecka and A. Wojtal-Frankiewicz, “The effects of road salt on freshwater ecosystems and solutions for mitigating chloride pollution - A review”, *Science of The Total Environment*, vol. 805, no. __, pp. 5, sep. 2021. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150289>. [Acceso: octubre 31, 2021].
- [6] Li, J., & Tabassum, S. “Synergism of hydrolytic acidification and sulfate reducing bacteria for acid production and desulfurization in the anaerobic baffled reactor: High sulfate sewage wastewater treatment.” (2022). *Chemical Engineering Journal*, 444, 136611. [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894722021064>. [Acceso: octubre 31, 2021].
- [7] S. Suárez Pérez, et al., “GUÍA AMBIENTAL PARA EL CULTIVO DE LA PAPA”, Bogotá, Colombia, mayo, 2004. [PDF]. Disponible: <https://redjusticiaambientalcolombia.files.wordpress.com/2012/09/guia-ambiental-para-el-cultivo-de-la-papa.pdf>. [Acceso: octubre 31, 2021].

- [8] Gobernación de Boyacá, “Desarrollo productivo”, Boyacá, Colombia, 2016. [PDF]. Disponible: <https://www.boyaca.gov.co/images/planes/plan-de-desarrollo/pdd2016-02-D-Productivo.pdf>. [Acceso: octubre 31, 2021].
- [9] R. A. Manrique Abril, “Caracterización del estado actual de la minería en el municipio de Paipa (Boyacá) y su relación con el distrito de manejo integrado (dmi) Sochagota.”, trabajo de investigación, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, 2020 [En línea]. Disponible en: <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/36852/ramanriquea.pdf?sequence=3&isAllowed=y> [Acceso: noviembre 01, 2021]
- [10] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (s.f). “Vertimientos y Reúso de Aguas Residuales - Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.”, [En línea]. <https://www.minambiente.gov.co/gestion-integral-del-recurso-hidrico/vertimientos-y-reuso-de-aguas-residuales/#tabs-1>. [Acceso: octubre 31, 2021]
- [11] M. R. Maxe Malca, “Estudio de la calidad físico-química y mineromedicinal del agua termal de los Baños del Inca”, UCV-HACER. Revista de Investigación y Cultura., vol. 4, no. 1, pp. 39, enero-junio. 2015. [En línea]. Disponible: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=521751973004> [Acceso: octubre 28, 2021]
- [12] J.R. Fagundo, A. Cima & P. González, “Revisión bibliográfica sobre clasificación de las aguas minerales y mineromedicinales” La Habana, Cuba, (s.f). [PDF] Disponible: https://www.sld.cu/galerias/pdf/sitios/rehabilitacion-bal/clasificacion_aguas_minerales.pdf [Acceso: octubre 28, 2021]
- [13] “¿Cómo solucionar el problema del agua?” ACCIONA BUSSINES AS UNUSSUAL (s.f) [En línea]. Disponible en: https://www.accionacom.es/tratamiento-de-agua/?_adin=02021864894. [Acceso: octubre 28, 2021]
- [14] A. Muñoz Cruz, “Caracterización y tratamiento de aguas residuales” Monografía, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 2008 [En línea]. Disponible en: <http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/bitstream/handle/231104/514/?sequence=1> [Acceso: noviembre 05, 2021]

[15] “Análisis de los sistemas de refrigeración solar por adsorción – capítulo 3: sistema de adsorción”. (s.f.). [PDF]. Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4986/fichero/Cap%C3%ADtulo3+Sistema+de+adsorci%C3%B3n.pdf>. [Acceso: noviembre 08, 2021]

[16] M. Bastidas, et al., “Producción de carbón activado a partir de precursores carbonosos del Departamento del Cesar, Colombia”, *Información Tecnológica*, vol. 21, no. 3, pp. 87-96, sep. 2009. [En línea]. Disponible en: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0718-07642010000300010&script=sci_arttext&lng=e. [Acceso: noviembre 08, 2021]

[17] O. Aguilar Sequeiros y B. Navarro Alfaro, “Evaluación de la calidad de agua para consumo humano de la comunidad de Llañucancha del distrito de Abancay, provincia de Abancay 2017” Tesis, Universidad Tecnológica de los Andes, 2018 [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.utea.edu.pe/bitstream/utea/130/3/TesisEvaluaci%C3%B3n%20de%20la%20calidad%20de%20agua%20para%20consumo%20humano.pdf>. [Acceso: octubre 28, 2021]

[18] Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico – INGEMMET., “Aguas termales y minerales en el centro del Perú – [Boletín D 21]”. INGEMMET, [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12544/338>. [Acceso: octubre 28, 2021].

[19] Y. Solís Castro, L. A. Zúñiga Zúñiga y D. Mora Alvarado, “La conductividad como parámetro predictivo de la dureza del agua en pozos y nacientes de Costa Rica”, *Rev. Tecnología en Marcha.*, vol. 31, no. 1, pp. 40, agosto. 2017. [En línea]. Disponible en: https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S0379-39822018000100035&script=sci_arttext. [Acceso: octubre 28, 2021].

[20] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, “Hoja metodológica del indicador índice de calidad del agua (Versión 1,1)”, IDEAM- Hoja metodológica del Índice de calidad del agua pp. 5-6-30. 2020. [En línea]. Disponible: <http://www.ideam.gov.co/documents/11769/646961/3.02+HM+%C3%8Dndice+Calidad+Agua.pdf/310580af-1ed1-4cbf-ade3-9d8c529c4220>. [Acceso: octubre 29, 2021].

[21] DANE “Sólidos en suspensión” [PDF]. Disponible: https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/pib/ambientales/Sima/solidos_suspension.pdf [Acceso: octubre 28, 2021]

[22] K.L. Ruiz Román “Validación de Métodos de ensayo para determinación de pH, Conductividad, Sólidos Sedimentables, Sólidos Suspendedos y Sólidos Disueltos en aguas en el Laboratorio Ambiental Environ Novalab.” Trabajo de grado, Universidad central del Ecuador, pp.30. 2018 [En línea]. Disponible en: <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/15362/1/T-UCE0017-0095-2018.pdf> [Acceso: octubre 29, 2021].

[23] A. García Vargas et al., “Cloruros totales en el agua de abastecimiento”, Ciudad de México, México, 20, nov. [PDF]. Disponible en: <https://repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/123456789/8825/1/clorurosnov12.pdf>. [Acceso: octubre 29, 2021].

[24] J. D. Bolaños Alfaro, G. Cordero Castro y G. Segura Araya, “Determinación de nitritos, nitratos, sulfatos y fosfatos en agua potable como indicadores de contaminación ocasionada por el hombre, en dos cantones de Alajuela (Costa Rica)”, Tecnología en Marcha., vol. 30, no. 4, pp. 17-18, mayo. 2017. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7436266>. [Acceso: octubre 29, 2021].

[25] C. Soldevilla y D. Medalit, “DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE LA DBO DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE UN BIOFILTRO DE PIEDRA PÓMEZ” Trabajo de grado, Universidad Nacional de Trujillo, pp. 5-14. 2015. [En línea]. Disponible en: https://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/3261/CornejoSoldevilla_D.pdf?sequence=1&isAllowed=y [Acceso: octubre 29, 2021].

[26] C. Pire, “Tratamiento de las aguas residuales” La contaminación, 9 diciembre 2019 [En línea]. Disponible en: <https://lacontaminacion.org/tratamiento-de-las-aguas-residuales/> [Acceso: marzo 05, 2022].

[27] "Tratamiento físico y químico" 04 ABRIL 2017” (s.f.). Fondo para la comunicación y educación ambiental, A.C. [En línea]. Disponible en: <https://agua.org.mx/glosario/tratamiento-fisico-y-quimico/#:~:text=%28Physical%20and%20chemical%20treatment%29%20Proceso%20generalmente%20usado%20para,coagulaci%C3%B3n%2C%20la%20cloraci%C3%B3n%2C%20o%20e1%20tratamiento%20con%20ozono.> [Acceso: marzo 05, 2022].

[28] "¿Qué es el tratamiento químico de aguas residuales?" (s.f.). Spiegato [En línea]. Disponible en: <https://spiegato.com/es/que-es-el-tratamiento-quimico-de-aguas-residuales> [Acceso: marzo 07, 2022].

[29] "Tratamiento Físico-Químico" (s.f.). GM Gestions. 17 de junio de 2020 [En línea]. Disponible en: <https://gmgestions.com/tratamiento-fisico-quimico/#:~:text=El%20tratamiento%20fi%CC%81sico%20qui%CC%81mico%20del%20agua%20residual%20tiene,convertirlas%20en%20parti%CC%81culas%20susceptibles%20de%20separacio%CC%81n%20por%20sedimentacio%CC%81n.> [Acceso: marzo 07, 2022].

[30] C. Arnáiz, L. Isac, & J. Lebrato. Tratamiento biológico de aguas residuales. (2000). Revista Tecnología del Agua. Pág 1, 2. Disponible en: <https://idus.us.es/handle/11441/34259>. [Acceso: marzo 07, 2022].

[31] Enzymatic wastewater treatment. 22 Feb. [En línea]. Disponible en: [read://https_ amapex.net/?url=https%3A%2F%2Famapex.net%2Fenzymatic-wastewater-treatment%2F%3Flang%3Den](https://amapex.net/?url=https%3A%2F%2Famapex.net%2Fenzymatic-wastewater-treatment%2F%3Flang%3Den) [Acceso: marzo 08, 2022].

[32] Cyclus "Oxidación Avanzada" [En línea]. Disponible en: <https://www.cyclusid.com/tecnologias-aguas-residuales/tratamiento-aguas/tratamiento-terciario/oxidacion-avanzada/#:~:text=Oxidaci%C3%B3n%20Avanzada%20Estos%20procesos%20tienen%20por%20objetivo%20la,y%20temperatura%20hasta%20la%20mineralizaci%C3%B3n%20completa%20de%20contaminantes.> [Acceso: marzo 08, 2022].

[33] Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, "RESOLUCIÓN 631 DE 2015 (marzo 17)" Colombia, 18, abril, 2015. [PDF]. Disponible: <http://www.emserchia.gov.co/PDF/Resolucion631.pdf>. [Acceso: noviembre 05, 2022].

[34] L. M. Barco Rincón y M. Méndez Angarita, "Identificación de las características hidrológicas y sanitarias del lago Sochagota y de fuentes de agua termomineral en el municipio de Paipa, Boyacá", Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander, 2010 [En línea]. Disponible en: <https://docplayer.es/14822639-Identificacion-de-las-caracteristicas-hidrologicas-y-sanitarias-dellago-sochagota-y-de-fuentes-de-agua-termomineral-en-el-municipio-de-paipa-boyaca.html>. [Acceso: octubre 25, 2021]

- [35] L. D. Duarte Sabogal y M. Mosquera Forero, “Alternativa de tratamiento de aguas provenientes de piscinas termales de Paipa para el posterior vertimiento en el río Chicamocha.” Trabajo de grado, Fundación Universidad de América, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/8662>. [Acceso: marzo 28, 2022]
- [36] J. C. Monroy Ramírez, A. J. Espinosa Ramírez y W. A. Jiménez Avella, “Hidroclimatología local e impactos en el lago Sochagota, Paipa, Boyacá”, *Ciencia e Ingeniería Neogranadina.*, vol. 31, no. 1, pp. 61, julio, 2021. [En línea]. Disponible: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0124-81702021000100053. [Acceso: noviembre 01, 2021]
- [37] Diaz, E. G. Arias, O. M. Structural assessment and geochemistry of thermal waters at the Cerro Machin Volcano (Colombia): An approach to understanding the geothermal system. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2020, vol. 400, p.4,7,13. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0377027320301116>. [Acceso: marzo 20, 2022]
- [38] Rojas, E. Fortich, M. & Pavajeau, H. (2014). Determinación del origen y la composición de las aguas termales ubicadas en los municipios de Becerril (Cesar) y Ciénaga (Magdalena), Colombia. Disponible: <https://repository.usc.edu.co/handle/20.500.12421/759>. [Acceso: marzo 20, 2022]
- [39] Saibi, H. Batir, J. F. Pocasangre, C. Hydrochemistry and geothermometry of thermal waters from UAE and their energetic potential assessment. *Geothermics*, 2021, vol. 92, p. 1-4. [En línea]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375650521000213> [Acceso: noviembre 01, 2021]
- [40] Díaz Barrera, L. F., & Martínez González, M. P. “Estado actual; Medios de promoción digitales en el sector hotelero del municipio de Paipa Boyacá”. (2021). [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.uan.edu.co/bitstream/123456789/1717/1/2020Luisa%20Fernanda%20Diaz%20Barrera.pdf> [Acceso: marzo 28, 2022]
- [41] Alcaldía de Paipa - Boyacá. "Municipio de Paipa" [En línea]. Disponible en: <https://www.paipa-boyaca.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Economia.aspx> [Acceso: marzo 29, 2022]

[42] Bernal. E. "Geografía cultural de Boyacá" (2022) [En línea]. Disponible en: http://www.boyacacultural.com/index.php?option=com_content&view=article&id=108&Itemid= [Acceso: marzo 15, 2022]

[43] Secretaría de salud Santander "Red vial Santander" (2020) [En línea]. Disponible en: <https://cruesantander.com/EMERGENCIAS-EN-SALUD-VIALES/> [Acceso: marzo 16, 2022]

[44] Pardo, F. A., & Velandia, D. Z. Evaluación del impacto ambiental generado por el vertimiento de aguas termo-minerales en la cuenca alta del río Chicamocha área salud Santander "Red vial Santander" (2020) [En línea]. Disponible en: <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/30049/2017fabi%C3%A1npardo.pdf?sequence=1> [Acceso: marzo 16, 2022]

[45] Fuentes, F. López, N. Hernández, P. Naranjo, C. Acosta, G. Combariza, E. Mojica, N. "DESCONTAMINACIÓN DE FUENTES HÍDRICAS" Julio de 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.corpoboyaca.gov.co/cms/wp-content/uploads/2020/07/INF-PREVIA-ESTABLECIMIENTO-META-CARGA-GLOBAL-CONTAMINANTE-PARA-3ER-QUINQUENIO-CUENCA-ALTA-Y-2DO-QUINQUENIO-CUENCA-MEDIA-RIO-CHICAMOCHA.pdf> [Acceso: abril 02, 2022]

[46] Jurisdicción Cámara de Comercio Duitama "CARACTERIZACIÓN SOCIOECONÓMICA Y EMPRESARIAL JURISDICCIÓN CÁMARA DE COMERCIO DE DUITAMA" (2018) [En línea]. Disponible en: <https://ccduitama.org.co/documentos/Observatorio/CARACTERIZACIONSOCIOECONOMICACCD2017.pdf> [Acceso: marzo 16, 2022]

[47] Instituto Nacional de Salud (INS) "Manual de Instrucciones para la Toma, Preservación y Transporte de Muestras de Agua de Consumo Humano para Análisis de Laboratorio, Artículo 27 del Decreto 1575 de 2007" (2011) [En línea]. Disponible en: <https://www.ins.gov.co/sivicap/Documentacin%20SIVICAP/2011%20Manual%20toma%20de%20muestras%20agua.pdf> [Acceso: julio 16, 2022]

[48] Sánchez, J. A., Álvarez, T., Pacheco, J. G., Carrillo, L., & González, R. A. "Calidad del agua subterránea: acuífero sur de Quintana Roo, México." Tecnología y ciencias del agua, (2016). 7(4),

75-96. [En línea]. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-24222016000400075&script=sci_arttext [Acceso: marzo 14, 2022]

[49] Lenntech B.V. "WATER TREATMENT" [En línea]. Disponible en: <https://www.lenntech.es/sulfatos.htm> [Acceso: marzo 18, 2022]

[50] Severiche, C. A., & González, H. "Evaluación analítica para la determinación de sulfatos en aguas por método turbidimétrico modificado." *Ingenierías USBMed*, (2012). 3(2), 6-11. [En línea]. Disponible en: <http://revistas.usbbog.edu.co/index.php/IngUSBmed/article/view/269/183> [Acceso: abril 20, 2022]

[51] Alto de la Vega, ubicación. [En línea]. Disponible en: <https://mapcarta.com/es/19895782> [Acceso: junio 10, 2022]

[52] Cortupaipa "Pozo Azul" (2018) [En línea]. Disponible en: <https://www.cortupaipa.com/pozo-azul/> [Acceso: mayo 01, 2022]

[53] Andueza, F., Chaucala, S., Vinueza, R., Escobar, S., Medina-Ramírez, G., & Araque, J. "Calidad microbiológica de las aguas termales del balneario "El Tingo". Pichincha. Ecuador. *Ars Pharmaceutica*" (2020). 61(1), 15-25. [En línea]. Disponible en: https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2340-98942020000100003 [Acceso: mayo 01, 2022]

[54] De La Rosa, J. & MOSSO, M.A. "DIVERSIDAD MICROBIANA DE LAS AGUAS MINERALES TERMALES" Universidad Complutense. Madrid. [En línea]. Disponible en: <https://aguas.igme.es/igme/publica/pdfart3/diversidad.pdf> [Acceso: marzo 19, 2022]

[55] Ministerio de Protección Social "EL MINISTRO DEL INTERIOR Y DE JUSTICIA DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA, DELEGATARIO DE FUNCIONES PRESIDENCIALES MEDIANTE DECRETO 2045 DEL 4 DE JUNIO DE 2009" [En línea]. Disponible en: <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/Decreto-2171-de-2009.pdf> [Acceso: mayo 02, 2022]

[56] Lloret, A. Segarra, C. y Bosque, M. " *Microsporium canis*: CARACTERÍSTICAS Y DIAGNÓSTICO" Unidad de Microbiología del Hospital Arnau de Vilanova, Valencia. [En línea]. Disponible en:

<https://www.seimc.org/contenidos/ccs/revisionestematicas/micologia/dermatof.pdf> [Acceso: mayo 05, 2022]

[57] Díaz, M.A. Darré, M.E. López, M. et al. "Análisis microbiológico de los alimentos - metodología analítica oficial" Anmat. Noviembre 2014, Pag 75. [En línea]. Disponible en: http://www.anmat.gov.ar/renaloea/docs/analisis_microbiologico_de_los_alimen [Acceso: mayo 05, 2022]

[58] Carrillo, E.M. & Lozano, A.M "validación del método de detección de coliformes totales y fecales en agua potable utilizando agua chromocult" Bogotá D.C, 2008. [En línea]. Disponible en: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/8205/tesis203.pdf?isAllowed=y&sequence=1> [Acceso: mayo 08, 2022]

[59] Uribe, L.A. "Caracterización fisiológica de levaduras aisladas de la filosfera de mora" Bogotá D.C. 2007. Pág 33 [En línea]. Disponible en: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/8298/tesis276.pdf?sequen> [Acceso: mayo 10, 2022]

[60] Rojas, M. M., Larrea, J. A., Romeu, B. Heydrich, M., & Rojas, N. M. Bacterias indicadoras de contaminación fecal en la evaluación de la calidad de las aguas: revisión de la literatura. Revista CENIC Ciencias Biológicas, (2013). Pág. 26. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/1812/181229302004.pdf> [Acceso: mayo 08, 2022]

[61] NAVARRO, M.O. "Determinación de escherichia coli y coliformes totales en agua por el método de filtración por membrana en agar chromocult" (2007). IDEAM. [En línea]. Disponible en: <http://ideam.gov.co/documents/14691/38155/Coliformes+totales+y+E.+coli+en+Agua+Filtraci%C3%B3n+por+Membrana.pdf/5414795c-370e-48ef-9818-ec54a0f01174#:~:text=La%20presencia%20de%20Escherichia%20coli,se%20considera%20como%20indicador%20universal> [Acceso: mayo 10, 2022]

[62] Marchand, E. O. "Microorganismos indicadores de la calidad del agua de consumo humano en Lima Metropolitana" [En línea]. Disponible en: https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/tesis/basic/marchand_p_e/anteced.htm#:~:text=Las%2

0Bacterias%20Heterotr%C3%B3ficas%20est%C3%A1n%20presentes,de%20la%20desinfecci%C3%B3n%20(descontaminaci%C3%B3n) [Acceso: mayo 12, 2022]

[63] González, M. I., García, M., & Alonso, M. D. L. Á. “Importancia sanitaria de Pseudomonas aeruginosa en agua de hemodiálisis y su desinfección.” (2014). Revista cubana de salud pública, 40(2), pág. 1 [En línea]. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-34662014000200005 [Acceso: mayo 12, 2022]

[64] NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 5594 “Calidad del agua. detección y recuento de pseudomonas aeruginosa por el método de filtración por membrana” 27, febrero, 2008. Pág. 6. [En línea]. Disponible en: <https://silo.tips/download/norma-tecnica-colombiana-5594> [Acceso: mayo 12, 2022]

[65] Soto, E., & Saavedra, C. “Influencia de la variación estacional de la calidad y cantidad de agua residual en la eficiencia de tratamiento: Caso de la planta de tratamiento de aguas residuales de Juan Díaz”, (2015). Panamá, República de Panamá. Revista de Iniciación Científica, 1(2), 7-18. [En línea]. Disponible en: <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/ric/article/view/445> [Acceso: mayo 14, 2022]

[66] Corporación autónoma regional del Valle del Cauca "BALANCE OFERTA-DEMANDA DE AGUA" 08, enero de 2015 [En línea]. Disponible en: https://www.cvc.gov.co/sites/default/files/Sistema_Gestion_de_Calidad/Procesos%20y%20procedimientos%20Vigente/0130_Caracterizacion%20y%20Balance%20de%20los%20Recursos%20Naturales%20y%20sus%20Actores%20Sociales%20Relevantes/Guias/GU.0130.07%20Balance%20oferta-demanda%20de%20agua.pdf [Acceso: mayo 14, 2022]

[67] “Influencia de la variación estacional de la calidad y cantidad de agua residual en la eficiencia de tratamiento: caso de la planta de tratamiento de aguas residuales de Juan Díaz, panamá, república de panamá” (2015). Revista de Iniciación Científica. Pág. 12. Disponible en: <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/ric/article/view/445> [Acceso: mayo 14, 2022]

[68] Proyecto universitario Fundación Universidad de América “Alternativa de tratamiento de aguas provenientes de piscinas termales de Paipa para el posterior vertimiento en el río

Chicamocha.”- REF: Información complementaria a la campaña realizada en marzo de 2021 por estudiantes de la Universidad de América.

[69] Díaz, J. C. “Alternativas para el manejo y aprovechamiento de aguas termominerales post- uso del municipio de Paipa (Boyacá).” (2020). [En línea]. Disponible en: http://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/16406/1/DiazJuan_2020_AprovechamientoAguasTermominerales.pdf [Acceso: mayo 15, 2022]

[70] Benítez, L., Mostue, M. B. & López, M. “Estudio fisicoquímico e isotópico de aguas termales del municipio Libertador del estado Sucre, Venezuela” (2015) Cumaná [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/4277/427739474012.pdf> [Acceso: mayo 15, 2022]

[71] Tambo, C.S. “Propuesta de un índice de calidad del agua como herramienta de gestión para los humedales capitalinos.” (2015) Bogotá D.C. [En línea]. Disponible en: <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2582/2015cristiantambo.pdf?sequence=8> [Acceso: mayo 17, 2022]

[72] Corredor, Y. A. V., & Pérez, L. I. P. “Aprovechamiento de residuos agroindustriales en el mejoramiento de la calidad del ambiente.” (2018). Revista Facultad de Ciencias Básicas, 59-72. [En línea]. Disponible en: <https://revistas.unimilitar.edu.co/index.php/rfcb/article/view/3108> [Acceso: mayo 20, 2022]

[73] Valladares, M. G., Valerio, C., de la Cruz-Burelo, P., & Melgoza, R. M. “Adsorventes não convencionais, alternativas sustentáveis para o tratamento de águas residuais.” (2017). Revista Ingenierías Universidad de Medellín, 16(31), 55-73. [En línea]. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/rium/v16n31/1692-3324-rium-16-31-00055.pdf> [Acceso: mayo 21, 2022]

[74] Dorregaray De La Cruz, H. J. “cáscaras de la fruta piña (Ananas comosus) para remover metales pesados (Cd²⁺, Pb²⁺) desde soluciones acuosas.” (2018). [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/4933> [Acceso: mayo 21, 2022]

[75] Murrieta Barrera, L. S. “Evaluación de la capacidad de adsorción de carbón activado mediante cáscara de naranja (Citrus Cinensis) para la remoción de iones de arsénico en aguas residuales

industriales.” (2019). [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/2451> [Acceso: mayo 26, 2022]

[76] Abdul, A., & Aberuagba, F. “Comparative study of the adsorption of phosphate by activated charcoal from corncobs, groundnut shells and rice-husks.” (2005). *Australian Journal of Technology*, 9, 59-63. [En línea]. Disponible en: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.589.7080&rep=rep1&type=pdf> [Acceso: mayo 26, 2022]

[77] Sovero Muñoz, H. J., & Chuquillanqui Tovar, L. E. “Adsorción de zinc (II) a partir del tamaño de partícula, cantidad del zuro de maíz “Zea mays” y el pH de las aguas acidas de la Unidad Minera Kolpa SA.” (2021). [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/6358> [Acceso: mayo 21, 2022]

[78] Prada, A., & Cortés, C. E. “La descomposición térmica de la cascarilla de arroz: una alternativa de aprovechamiento integral.” (2010). *Orinoquia*, 14, 155-170. [En línea]. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-37092010000300013 [Acceso: mayo 20, 2022]

[79] Llanos Páez, O., Ríos Navarro, A., Jaramillo Páez, C. A., & Rodríguez Herrera, L. F. “La cascarilla de arroz como una alternativa en procesos de descontaminación. Producción + limpia” (2016). 11(2), 150-160. [En línea]. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552016000200013 [Acceso: mayo 20, 2022]

[80] López, L.C. “Evaluación de la adsorción de partes óseas de res en un dispositivo de flujo continuo, para la remoción de iones de calcio, magnesio, aluminio, hierro, sulfato, carbonato y cloruro; a escala de laboratorio Guatemala.” marzo de 2016. [En línea]. Disponible en: <http://www.repositorio.usac.edu.gt/4283/1/Luis%20Carlos%20L%C3%B3pez%20Quintana.pdf> [Acceso: mayo 22, 2022]

[81] Callo, A. J., & Flores, N. D. “Caracterización del carbón activado de huesos de Alpaca (Vicugna pacos) por activación química con hidróxido de sodio, ácido fosfórico y tiempo de pirólisis.” (2020). [En línea]. Disponible

en:https://repositorio.upeu.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12840/4858/Nury_Tesis_Licenciatura_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y [Acceso: mayo 22, 2022]

[82] Shaarani, F. W., & Hameed, B. H. “Ammonia-modified activated carbon for the adsorption of 2, 4-dichlorophenol.” (2011). *Chemical engineering journal*, 169(1-3), 180-185. [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894711002889> [Acceso: mayo 29, 2022]

[83] Shen, L., et al., “Powdered activated coke for COD removal in the advanced treatment of mixed chemical wastewaters and regeneration by Fenton oxidation”, *Chemical Engineering Journal*, vol. 371, pp. 631-638., sep. 2019. [En línea] Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894719308642> [Acceso: junio 02, 2022]

[84] DUARTE, L.V. SUAREZ, J.F. “CARACTERIZACIÓN DE PRESTADORES DE SERVICIOS TURÍSTICOS DEL DEPARTAMENTO DE BOYACÁ: CASO PROVINCIA DE TUNDA” DUITAMA, 2017. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/001/2714/1/TGT_1335.pdf [Acceso: mayo 30, 2022]

[85] Romero, E. C., & Mangona, L. C. “Análisis del desarrollo de las cadenas productivas en Colombia durante el año 2020.” (2021). *Revista EDIS* ISSN: 2711-3949, 2(2), Pág. 87 [En línea]. Disponible en: <https://revista.redgade.com/index.php/EDIS/article/view/40/13> [Acceso: junio 02, 2022]

[86] ADAME, R. B., & ROJAS, L. G. A. “PLAN DEPARTAMENTAL DE EXTENSIÓN AGROPECUARIA (PDEA) 2020-2023.” Pág. 54-56 [En línea]. Disponible en: <https://www.minagricultura.gov.co/ministerio/direcciones/PublishingImages/Paginas/PDEA/Boyaca.pdf> [Acceso: junio 05, 2022]

[87] Agonet mincultura “Estadísticas” (2022). [En línea]. Disponible en: <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=2#> [Acceso: abril 18, 2022]

[88] Medina, J. E. “Análisis de factibilidad aplicado a una planta de biorefinación por conversión hidrotermal HTC de la biomasa residual de la papa, para la obtención de bioproductos (Doctoral dissertation, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Facultad de Ingeniería)”. (2019). Pág 17-20 [En línea]. Disponible en:

https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/001/3574/1/Analisis_de_factibilidad.pdf [Acceso: junio 02, 2022]

[89] Suarez, S. et al. “GUÍA AMBIENTAL PARA EL CULTIVO DE LA PAPA” (2004) [En línea]. Pág. 29. Disponible en: <https://redjusticiaambientalcolombia.files.wordpress.com/2012/09/guia-ambiental-para-el-cultivo-de-la-papa.pdf> [Acceso: junio 05, 2022]

[90] López, H. E., Pérez, E. N., & Cáceres, A. P. “Formulación de medidas higiénico sanitarias y ambientales con énfasis en producción más limpia para los expendios cárnicos del municipio de Duitama.” (2017) Pág 13 y 33. [En línea]. Disponible en: <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/13836/1057588540.pdf?sequence=6&isAllowed=y> [Acceso: junio 02, 2022]

[91] Cárdenas, L.M. & Agudelo, S. “Evaluación física–química del sistema de regulación de las aguas Termo-Minerales (Dársena L1) del Municipio de Paipa-Boyacá.” (2020) UNIVERSIDAD LIBRE, 119. [En línea]. Disponible en: <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/37274/BallesterosCabraLeidyHeraldine2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [Acceso: junio 07, 2022]

[92] Gómez, D.A “Modelo geotérmico de Paipa mediante exploración del subsuelo y análisis físico químico de aguas termales” (2019). Tunja. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/001/3453/1/Modelo_geotermico_de_Paipa.pdf [Acceso: junio 07, 2022]

[93] Ballesteros, L.H. “Alternativas de manejo para la inactivación de coliformes totales de las aguas termominerales post uso del municipio de Paipa Boyacá” (2020), Bogotá D.C. [En línea]. Disponible en: <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/37274/BallesterosCabraLeidyHeraldine2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [Acceso: junio 07, 2022]

[94] Aponte, L.M. “Análisis del aporte contaminante generado por el vertimiento termomineral del hotel panorama (Paipa) sobre la fuente receptora río Chicamocha” (2019), Bogotá D.C. [En línea]. Disponible en:

<https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/25530/1/PROYECTO%20FINAL%202021-12.pdf> [Acceso: junio 07, 2022]

[95] “FICHA TÉCNICA. Sistema de Información del Medio Ambiente” (s. f) DANE [En línea]. Disponible en: https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/pib/ambientales/Sima/solidos_suspension.pdf [Acceso: junio 09, 2022]

[96] Hernández, D. “Tratamiento acoplado fisicoquímico-electrocoagulación para incrementar la remoción de la materia orgánica de un agua residual de rastro municipal”. Tesis, Universidad Autónoma del Estado de México, 2016 [En línea]. Disponible en: <http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/65337/TESIS-splitmerge.pdf?sequence=3&isAllowed=y> [Acceso: junio 09, 2022]

[97] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. “Resolución No. 1256 del 23 de 2021: Por la cual se reglamenta el uso de las aguas residuales y se adoptan otras disposiciones.” (2021) [En línea]. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/12/Resolucion-1256-de-2021.pdf> [Acceso: julio 16, 2022]

[98] Espinoza, R. “Planta de tratamiento de aguas residuales en San Juan de Miraflores”. Tesis para optar el título de Máster en Gestión y Auditorías Ambientales, Universidad de Piura. (2010) [En línea]. Disponible en: <https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/1478> [Acceso: junio 09, 2022]

[99] Muñoz, A. “Caracterización y tratamiento de aguas residuales”. Monografía para obtener el título de ingeniero industrial, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. (2008) [En línea]. Disponible en: <http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/bitstream/handle/231104/514/?sequence=1> [Acceso: junio 09, 2022]

[100] Céspedes, D. N, “Tratamiento terciario de aguas residuales no domésticas empleando a *Chlorella* sp. y conversión de la biomasa microbiana por pirolisis lenta” (2019). Trabajo de grado. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C. [En línea]. Disponible en: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/43200/Tesis%20repositorio.pdf?sequence=4&isAllowed=y> [Acceso: junio 10, 2022]

- [101] Planeta, I. P., & Jarava, R. “Análisis de alternativas para la remoción de cloruros presentes en las aguas residuales industriales de producción del campo Cicuco Ecopetrol SA” (2017). [En línea]. Disponible en: <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/13789/1052040776.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [Acceso: junio 10, 2022]
- [102] Oruna, J. C. “Obtención de agua ultrapura en la industria mediante intercambio iónico. Paradigmas.” (2012). 4(1). [En línea]. Disponible en: <http://revistas.urp.edu.pe/index.php/Paradigmas/article/view/553/554> [Acceso: junio 10, 2022]
- [103] “Intercambio Iónico” Carbotecnia (s. f) [En línea]. Disponible en: <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/suavizadores-y-desmineralizadores/que-es-elintercambio-ionico-y-tipos-de-resinas/> [Acceso: junio 11, 2022]
- [104] “Resina para suavizadores Catiónica Aquafine.” Carbotecnia (s. f) [En línea]. Disponible en: <https://www.carbotecnia.info/producto/medio-resina-cationica-parasuavizadores/#:~:text=Resinas%20cati%C3%B3nicas%20de%20C3%A1cido%20fuerte%3A&text=Este%20tipo%20de%20resina%20es,desmineralizadores%20o%20para%20lechos%20mixtos.> [Acceso: junio 11, 2022]
- [105] Alfonso, H. M., Pérez, G., Díaz, I., Delgado, S. A., & de Armas y Leyva, R. “Resinas de intercambio iónico para prolongar la liberación de los fármacos.” *Revista Cubana de Farmacia*, (2000). 34(3), 196-206. [En línea]. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S0034-75152000000300007&script=sci_arttext&tlng=pt [Acceso: junio 11, 2022]
- [106] Sánchez, R. “Diseño de un sistema de control para el proceso de ablandamiento de agua mediante resinas de intercambio iónico”. 2019.[En línea]. Disponible en: https://oa.upm.es/56831/1/TFG_RODRIGO_SANCHEZ_VERA.pdf [Acceso: junio 09, 2022]
- [107] Gómez, P.” Tratamiento de aguas del proceso siderúrgico mediante intercambio iónico y tecnología de membranas” (Doctoral dissertation, Universidad de Oviedo). (2016). [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=207761> [Acceso: junio 08, 2022]
- [108] Mamelkina, M. A., Tuunila, R., Sillanpaa, M., & Hakkinen, A. “Systematic study on sulfate removal from mining waters by electrocoagulation.” *Separation and Purification Technology*

(2019). 216, 43 y 44. [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586618337468> [Acceso: junio 11, 2022]

[109] Hernández, D. “Tratamiento acoplado fisicoquímico-electrocoagulación para incrementar la remoción de la materia orgánica de un agua residual de rastro municipal”. Tesis, Universidad Autónoma del Estado de México, 2016 [En línea]. Disponible en: <http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/65337/TESIS-splitmerge.pdf?sequence=3&isAllowed=y> [Acceso: junio 08, 2022]

[110] J. HUESA “Ósmosis inversa” WATER TECHNOLOGY [En línea]. Disponible en: <https://jhuesa.com/tecnologias/osmosisinversa#:~:text=La%20%20C3%B3smosis%20inversa%20es%20una,electroest%C3%A1tica%20de%20bajo%20peso%20molecular.> [Acceso: junio 08, 2022]

[111] Dévora, G. E., Robles, A., Lares, L. A., Valdez, J. C., & Torres, I. Y. “Desalación de aguas salobre por Electrodiálisis Reversible: Viabilidad para rescate de pozos abandonados en Sonora, México.” (2019) Revista Latinoamericana de Recursos Naturales. 15(3), 78. [En línea]. Disponible en: <http://revista.itson.edu.mx/index.php/rlrn/article/view/283/216> [Acceso: junio 12, 2022]

[112] Hernández, J., & Ruíz, D. “Removal of chloride ions from a copper leaching solution, using electro dialysis, to improve the uranium extraction through ion-exchange.” Journal of Hazardous Materials (2021). 420, 2 y 3. [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389421015478> [Acceso: junio 12, 2022]

[113] Salas, J.J. “Herramienta para la selección del tratamiento de las aguas residuales (I)” Fundación pública Andaluza CENTA. 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.iagua.es/blogs/juan-jose-salas/herramienta-seleccion-tratamiento-aguasresiduales-i> [Acceso: junio 11, 2022]

[114] Gómez, Y. & Vera, L. M. “Simulación del pretratamiento de agua de mar para su desalación” 2013 vol.33, n.3 [En línea]. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852013000300007&lng=es&nrm=iso [Acceso: junio 04, 2022]

[115] Campos, D., & Jiménez, M. “Diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales y de producción evaluando las diferentes alternativas nacionales y extranjeras–aplicación campo colorado” (2009). Doctoral dissertation, Tesis de pregrado, Dep. Ingeniería de Petróleos, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga-Colombia. [En línea]. Disponible en: <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2009/129404.pdf> [Acceso: junio 04, 2022]

[116] Carrillo Trujillo, M. P. “Desarrollo de una propuesta de mejora para la reutilización de agua en los procesos de calibración de equipos volumétricos en Colmetrik SAS” (2020). Trabajo de grado, Fundación Universidad de América [En línea]. Disponible en: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7797/1/6142416-2020-1-IQ.pdf> [Acceso: julio 16, 2022]

[117] Garriz, C. A. “Subproductos ganaderos: huesos” (2000) Instituto de la Promoción de la Carne Vacuna Argentina (IPCVA). [En línea] Disponible en: <http://www.ipcva.com.ar/files/huesos.pdf> [Acceso: junio 10, 2022]

[118] Ramos Carrillo, N. F., “Aprovechamiento del desecho de huesos de res para la obtención de harina de hueso en la fábrica Federer” (2010). Proyecto previo a la obtención del título de ingeniero agroindustrial. Escuela Politécnica Nacional, Quito. [En línea]. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/2379/1/CD-3111.pdf> [Acceso: junio 13, 2022]

[119] Sisson, S. & Grossman, D., “Anatomía de los animales domésticos” (1999). Quinta edición, Editorial Masson S.A, Madrid, España, pp. 22 - 28. [En línea]. Disponible en: <https://store.grupoasis.com/es/anatomia/1101-anatomia-de-los-animales-domesticos-tomo-i.html> [Acceso: junio 13, 2022]

[120] Acevedo Murillo, Y. S., “Estudio de adsorción de fenol y 2, 4-dinitrofenol desde solución acuosa sobre materiales porosos obtenidos a partir de huesos de bovino, porcino y pollo” (2011). (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia). [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/9537/197552.2011.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [Acceso: junio 13, 2022]

[121] Ghahfarrokhi, A., Moshiri, P., & Ghiaci, M. “Studies on calcined cow bone and pyrolyzed wood, suitable supports for immobilizing hybrid nano particles of Co-Mn as new catalysts for oxidation of 2,6-diisopropyl naphthalene”, Applied Catalysis A: General, vol. 456, pp. 51-58,

abril. 2013. [En línea]. Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926860X13000926> [Acceso: junio 13, 2022]

[122] Hubadullah, S., et al., “Novel hydroxyapatite-based bio-ceramic hollow fiber membrane derived from waste cow bone for textile wastewater treatment”, *Chemical Engineering Journal*, vol. 379. 2020. [En línea]. Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894719317991> [Acceso: junio 13, 2022]

[123] Adeniyi, A., et al., “Metal oxide rich char from muffle furnace and retort heated reactor treated cow bone”, *Cleaner Engineering and Technology*, vol. 8., jun. 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666790822000908> [Acceso: junio 12, 2022]

[124] Arroyo, L., & Ruiz, D. “Determinación de la cinética de adsorción de cloruros de vertimientos del sector agrícola cultivos energéticos, sobre carbón activado comercial.” (2018). Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia. [En línea]. Disponible en: <http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500> [Acceso: junio 12, 2022]

[125] Delgado, E. F. L. “La importancia del carbón mineral en el desarrollo.” (2006). *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*, 9(18), 91-97. [En línea]. Disponible en: <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/iigeo/article/view/579/469> [Acceso: junio 12, 2022]

[126] Real Hojas, J. A. “Diseño de un sistema para el proceso de molienda de carbón mineral para ser usado como combustible industrial” (2006) (Bachelor's thesis). [En línea] Disponible en: <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/handle/10893/16947/CB0573178.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [Acceso: junio 12, 2022]

[127] Morales K. J. “Carbón activado para la adsorción de oro de soluciones cianuradas a partir de carbones minerales.” (2017). [En línea] Disponible en: <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/5541> [Acceso: junio 12, 2022]

[128] Manrique Abril, R. A., “Caracterización del estado actual de la minería en el municipio de Paipa (Boyacá) y su relación con el distrito de manejo integrado (dmi) Sochagota.” (2020). Trabajo

de investigación parcial para optar al título de ingeniero ambiental. Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Tunja, Colombia. [En línea]. Disponible en: <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/36852/ramanriquea.pdf?sequence=3&isAllowed=y> [Acceso: junio 11, 2022]

[129] Gao, Q., et al., “Removal of organic pollutants in coking wastewater based on coal based adsorbents: A pilot-scale study of static adsorption and flotation”, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 9., dic. 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213343721018212> [Acceso: junio 11, 2022]

[130] Li, S., et al., “Modification and application of coking coal by alkali pretreatment in wastewater adsorption”, *Separation Science and Technology*, vol. 16, pp. 2532-2535. 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.tandfonline.com/action/showCitFormats?doi=10.1080%2F01496395.2017.1355383> [Acceso: junio 11, 2022]

[131] “Spectroquant Test Cloruros” Merck. [En línea]. Disponible en: https://www.merckmillipore.com/INTERSHOP/web/WFS/Merck-INTL-Site/en_US/-/USD/ShowDocument-File?ProductSKU=MDA_CHEM114897&DocumentId=9478.ProNet&DocumentType=PI&Language=ES&Country=NF&Origin=PDP [Acceso: junio 14, 2022]

[132] Dagnino, J. “Análisis de varianza.” (2014). *Revista chilena de anestesia*, 43(4), 306-310. [En línea]. Disponible en: <https://revistachilenadeanestesia.cl/PII/revchilanestv43n04.07.pdf> [Acceso: julio 16, 2022]

[133] “Transmitancia, absorbancia y ley de lambert-beer” (s. f) Departamento de Biología Aplicada - Universidad Miguel Hernández de Elche [En línea]. Disponible en: https://repositorio.innovacionumh.es/Proyectos/P_22CursoMateriales/Miguel_Angel_Sogorb/Wimba/Espectroscopia_05.htm [Acceso: junio 14, 2022]

ANEXOS

ANEXO 1

Informe de resultados ensayo microbiológico Instituto de Turismo de Paipa

ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO	Expresión	Valor Admisible	Valor obtenido							Método
			Lavamanos baños mujeres	Lavamanos baños hombres	Piscina Cisnes-Rampa de Entrada	Centro de hidroterapia - Jacuzzi	SPA termal - Cama de burbujas	Piscina Panorámica-Zona de escalera profunda	Piscina Centro de Hidroterapia-Zona rampa	
Lugar de muestreo										
Fecha de Muestreo			16/03/2022	16/03/2022	16/03/2022	16/03/2022	16/03/2022	16/03/2022	16/03/2022	
Hora de Muestreo			10:25	10:28	10:38	10:45	10:55	10:20	10:40	
Dermatofitos	Pres/Aus	Ausencia	Ausentes	Ausentes	Ausentes	Ausentes	Presentes	NA	NA	Recuento de placa
Mohos	UFC/cm ²	<10	0	0	3	0	7	NA	NA	Filtración por membrana
Levaduras	UFC/cm ²	<10	0	0	0	0	2	NA	NA	Filtración por membrana
Coliformes Termotolerantes	UFC/100 cm ³	0	NA	NA	NA	NA	NA	3	0	SM 9222 J
E. Coli	UFC/100 cm ³	0	NA	NA	NA	NA	NA	0	0	SM 9222 J
Heterótrofos	UFC/100 cm ³	200	NA	NA	NA	NA	NA	26	17	SM 9215 J
Pseudomona aeruginosa	UFC/100 cm ³	0	NA	NA	NA	NA	NA	0	0	NTC 5594:2008

Nota. La tabla muestra los resultados de los análisis microbiológicos tomados en las zonas de mayor uso por los visitantes del ITP, como también se muestra el método por el cual se evaluó cada uno de los parámetros. **NA:** No Aplica. Datos proporcionados por el Instituto de Turismo de Paipa.

ANEXO 2

Bitácoras de la campaña de muestreo 2022

1er Día		PRIMERA TOMA		1er Día	
Código	0413-001P001	Código	0413-001P002	Código	0413-001P003
Fecha	13/4/2022	Fecha	13/4/2022	Fecha	13/4/2022
Hora	2:17 PM	Hora	3:00 PM	Hora	4:10 PM
Ubicación	Piscina Olímpica	Ubicación	Pozo Azul	Ubicación	Canal de Vargas
Profundidad (cm)	NA	Profundidad (cm)	NA	Profundidad (cm)	28
Caudal (L/s)	NA	Caudal (L/s)	NA	Caudal (L/s)	0.5
Latitud	5.75	Latitud	5.75	Latitud	5.75
Longitud	73.108	Longitud	73.109	Longitud	73.109
Elevación	2487.413	Elevación	2496	Elevación	2496.0065
Time Zone	75 (GMT-5)	Time Zone	75 (GMT-5)	Time Zone	75 (GMT-5)
Temperatura (°C)	20.01	Temperatura (°C)	17.97	Temperatura (°C)	17.97
Radiación (W/m²)	517	Radiación (W/m²)	986	Radiación (W/m²)	655.36
Cobertura nubosa (octas)	8	Cobertura nubosa (octas)	8	Cobertura nubosa (octas)	8
T bulbo seco (°C)	19.4	T bulbo seco (°C)	24.1	T bulbo seco (°C)	NA
Humedad (%)	66	Humedad (%)	68	Humedad (%)	68
Precipitación	NA	Precipitación	NA	Precipitación	NA
Conductividad (ohmios)	1068	Conductividad (ohmios)	986	Conductividad (ohmios)	990
T del agua (°C)	37.9	T del agua (°C)	52.13	T del agua (°C)	44.1
Observaciones	La piscina Cisneros se encuentra en mantenimiento y limpieza para ponerla en funcionamiento al día siguiente.	Observaciones	Se le realiza limpieza de algas una vez al mes, para evitar su acumulación.	Observaciones	Vertimiento de las piscinas termales (no tienen agua de baños solo de las piscinas)

1er Día		SEGUNDA TOMA		1er Día	
Código	0413-003P001	Código	0413-003P002	Código	0413-003P003
Fecha	13/4/2022	Fecha	13/4/2022	Fecha	13/4/2022
Hora	5:47 PM	Hora	6:09 PM	Hora	6:27 PM
Ubicación	Piscina Olímpica	Ubicación	Pozo Azul	Ubicación	Canal de Vargas
Profundidad (cm)	NA	Profundidad (cm)	NA	Profundidad (cm)	28
Caudal (L/s)	NA	Caudal (L/s)	NA	Caudal (L/s)	0.17
Latitud	5.75	Latitud	5.75	Latitud	5.75
Longitud	73.108	Longitud	73.109	Longitud	73.109
Elevación	2485.8036	Elevación	2495.8297	Elevación	2495.8297
Time Zone	75 (GMT-5)	Time Zone	75 (GMT-5)	Time Zone	75 (GMT-5)
Temperatura (°C)	14.68	Temperatura (°C)	14.68	Temperatura (°C)	14.68
Radiación (W/m²)	13.43	Radiación (W/m²)	0	Radiación (W/m²)	0
Cobertura nubosa (octas)	3	Cobertura nubosa (octas)	NA	Cobertura nubosa (octas)	NA
T bulbo seco (°C)	19.2	T bulbo seco (°C)	19.5	T bulbo seco (°C)	19.1
Humedad (%)	82	Humedad (%)	82	Humedad (%)	82
Precipitación	NA	Precipitación	NA	Precipitación	NA
Conductividad (ohmios)	998	Conductividad (ohmios)	950	Conductividad (ohmios)	1002
T del agua (°C)	36.90	T del agua (°C)	53.76	T del agua (°C)	39.1
Observaciones	NA	Observaciones	Aunque la altura del pozo no se sabe, se observa por simple vista que disminuyo su altura respecto a lo visto en la mañana	Observaciones	Se observa un menor caudal, olor a azufre, temperatura constante.

PRIMERA TOMA					
2do Día			2do Día		
Código	0413-005P003			Código	0414-005P002
	0413-006P003			0414-006P002	
Fecha	14/4/2022		Fecha	14/4/2022	
Hora	9:21AM		Hora	9:40 AM	
Ubicación	Canal de vargas		Ubicación	Pozo Azul	
Profundidad (cm)	31		Profundidad (cm)	NA	
Caudal (L/s)	2.33		Caudal (L/s)	NA	
Latitud	5.75		Latitud	5.75	
Longitud	73.108		Longitud	73.109	
Elevación	2496.1625		Elevación	2509.1791	
Time Zone	75 (GMT-5)		Time Zone	75 (GMT-5)	
Temperatura (°C)	16.01		Temperatura (°C)	17.74	
Radiación (W/m²)	11408		Radiación (W/m²)	23323	
Cobertura nubosa (octas)	4		Cobertura nubosa (octas)	0	
T bulbo seco (°C)	21.2		T bulbo seco (°C)	21.9	
Humedad (%)	63		Humedad (%)	56	
Precipitación	NA		Precipitación	NA	
Conductividad (ohmios)	1025		Conductividad (ohmios)	902	
T del agua (°C)	41		T del agua (°C)	52.96	
Observaciones	EL flujo de aguas es mayor con respecto al día anterior, se percibe un olor más fuerte, el cielo se encontraba despejado.		Observaciones	Se evidenciaba una ebullición abundante en el Pozo Azul, la piscina panorámica se encontraba en mantenimiento.	

SEGUNDA TOMA					
2do Día			2do Día		
Código	0414-007P002			Código	0414-007P003
	-			-	
Fecha	14/4/2022		Fecha	14/4/2022	
Hora	2:10 PM		Hora	4:22 PM	
Ubicación	Pozo Azul		Ubicación	Canal de Vargas	
Profundidad (cm)	NA		Profundidad (cm)	26	
Caudal (L/s)	NA		Caudal (L/s)	1.67	
Latitud	5.7569		Latitud	5.75	
Longitud	73.1091		Longitud	73.108	
Elevación	2509.1791		Elevación	2486.6545	
Time Zone	75 (GMT-5)		Time Zone	75 (GMT-5)	
Temperatura (°C)	18.9		Temperatura (°C)	18.19	
Radiación (W/m²)	232		Radiación (W/m²)	36	
Cobertura nubosa (octas)	8		Cobertura nubosa (octas)	8	
T bulbo seco (°C)	22.2		T bulbo seco (°C)	21.9	
Humedad (%)	65		Humedad (%)	65	
Precipitación	NA		Precipitación	NA	
Conductividad (ohmios)	901		Conductividad (ohmios)	1014	
T del agua (°C)	51.95		T del agua (°C)	39.15	
Observaciones	Se observó un nivel más bajo en el pozo, por lo tanto la visualización de algas era mayor.		Observaciones	Se presentaron precipitaciones desde las 13:40 hrs hasta las 14:14 hrs, por lo que se toma una sola una prueba	

TERCERA TOMA				
2do Día			2do Día	
Código	0414-008P002			Código
	-			-
Fecha	14/4/2022		Fecha	14/4/2022
Hora	6:20 PM		Hora	6:40 PM
Ubicación	Pozo Azul		Ubicación	Canal de Vargas
Profundidad (cm)	NA		Profundidad (cm)	25
Caudal (L/s)	NA		Caudal (L/s)	1
Latitud	5.7567		Latitud	5.7567
Longitud	73.1093		Longitud	73.1093
Elevación	2492.0379		Elevación	2492.0379
Time Zone	75 (GMT-5)		Time Zone	75 (GMT-5)
Temperatura (°C)	14.45		Temperatura (°C)	14.45
Radiación (W/m²)	0		Radiación (W/m²)	0
Cobertura nubosa (octas)	NA		Cobertura nubosa (octas)	NA
T bulbo seco (°C)	19.4		T bulbo seco (°C)	-
Humedad (%)	84		Humedad (%)	84
Precipitación	NA		Precipitación	NA
Conductividad (ohmios)	889		Conductividad (ohmios)	906
T del agua (°C)	53		T del agua (°C)	38.23
Observaciones	El nivel continúa siendo bajo, por lo que se visualizaban las algas presentes en el pozo. Se puede observar mayor vapor que en la mañana.		Observaciones	Continuó lloviendo antes y después de la toma de muestras.

PRIMERA TOMA			
3er Día			3er Día
Código	0415-005P001		Código
	0415-006P001		0415-009P003
Fecha	15/4/2022		Fecha
Hora	10:00 AM		15/4/2022
Ubicación	Piscina Panorámica		Hora
Profundidad (cm)	-		10:30 AM
Caudal (L/s)	NA		Ubicación
Latitud	5.7573		Canal de Vargas
Longitud	73.1088		Profundidad (cm)
Elevación	2488.9375		25
Time Zone	75 (GMT-5)		Caudal (L/s)
Temperatura (°C)	18.58		NA
Radiación (W/m²)	820		Latitud
Cobertura nubosa (octas)	8		5.75
T bulbo seco (°C)	20.1		Longitud
Humedad (%)	58		73.108
Precipitación	NA		Elevación
Conductividad (ohmios)	870		2496.1625
T del agua (°C)	39.33		Time Zone
			75 (GMT-5)
			Temperatura (°C)
			16.01
			Radiación (W/m²)
			11408
			Cobertura nubosa (octas)
			8
			T bulbo seco (°C)
			22.4
			Humedad (%)
			58
			Precipitación
			NA
			Conductividad (ohmios)
			905
			T del agua (°C)
			43.23
Observaciones	El cielo se visualizaba nublado, hubo aumento en la afluencia		Observaciones
			El observó que el flujo del vertimiento era mejor, pero el olor a azufre había aumentando. Se presentaron precipitaciones en mínimas cantidades (llovizna), por lo que se toma solo una muestra

SEGUNDA TOMA				
3er Día			3er Día	
Código	0415-007P001			Código
	0415-008P001			-
Fecha	15/4/2022		Fecha	15/4/2022
Hora	2:00 PM		Hora	2:30 AM
Ubicación	Piscina Panorámica		Ubicación	Canal de Vargas
Profundidad (cm)	-		Profundidad (cm)	26
Caudal (L/s)	NA		Caudal (L/s)	NA
Latitud	5.7573		Latitud	5.7574
Longitud	73.1081		Longitud	73.1086
Elevación	2489.9978		Elevación	2488.1942
Time Zone	75 (GMT-5)		Time Zone	75 (GMT-5)
Temperatura (°C)	19.66		Temperatura (°C)	18.8
Radiación (W/m²)	577		Radiación (W/m²)	1963
Cobertura nubosa (octas)	3		Cobertura nubosa (octas)	3
T bulbo seco (°C)	23.6		T bulbo seco (°C)	22.4
Humedad (%)	57		Humedad (%)	62
Precipitación	NA		Precipitación	NA
Conductividad (ohmios)	921		Conductividad (ohmios)	912
T del agua (°C)	39.73		T del agua (°C)	39.8
Observaciones	El cielo se visualizaba nublado, hubo aumento en la afluencia		Observaciones	Hubo mucho sol, cielo parcialmente despejado. Solo se tomó una muestra debido a la mínima precipitación que se presentó en la mañana.

ANEXO 3

 <p>CYANAM S.A.S Consultoría y Análisis Ambiental S.A.S</p>	<p>GC-F-017 V03 REPORTE DE RESULTADOS 2153-22</p>	 <p>IDEAM Instituto de Hidrología, Meteorología y Estadística Ambiental <i>Resolución 1519 del 07 de diciembre de 2021</i></p>
---	---	--

EMPRESA	MANUELITA PEÑA ROJAS	ID MUESTRA	2153-22
DIRECCION	CALLE 134 BIS # 19-35	FECHA TOMA MUESTRA	2022-04-13
TELEFONO	313 4127053	FECHA INGRESO MUESTRA	2022-05-06
CONTACTO	MANUELITA PEÑA ROJAS	RESPONSABLE MUESTREO	cliente
NIT	NR	SITIO MUESTREO	Vertimiento canal de Vargas (piscina)
E-MAIL	samantha.urrego@estudiantes.uamerica.edu.co	TIPO MUESTRA	Agua superficial
FECHA DE INFORME	2022-05-17	TIPO MUESTREO	Puntual hora: 18:27

RESULTADOS DE ANALISIS DE LABORATORIO Y MEDICIONES EN SITIO								
FECHA ANALISIS <small>(AAAA-MM-DD)</small>	VARIABLE	METODO / TÉCNICA	UNIDAD	¹ LC	RESULTADOS	INCERTIDUMBRE	NORMATIVIDAD	CONFORMIDAD
2022-05-09	Cloruros	S.M. 4500 - Cl - B - Método Argentó métrico	mgCl / L	5	4907	0,12	NA	NR
2022-05-09	Sulfatos	S.M. 4500-SO ₄ E Método turbidímetro	mg/L SO ₄	10	4492	0,20	NA	NR

¹LC: Límite de cuantificación ²Parámetros de medición en sitio ³Parámetros subcontratados NA: No Aplica NR: No reporta La variable de DBO5 fue analizada a 20±3°C

NOTA IMPORTANTE: SE REPORTA VALOR REAL A SOLICITUD DEL CLIENTE PARA PROYECTO DE GRADO

Los resultados consignados se relacionan únicamente con la muestra sometida a ensayo ID 2153-22
Prohibida la reproducción parcial o total de este informe sin autorización del cliente y/o CYANAM SAS
Análisis realizados en las instalaciones de CYANAM SAS de acuerdo a los lineamientos de American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Edition 23.



Dennys Alejandra Samacá Ch.
Director de Calidad - R.P. 15625



Blanca Samacá Ch.
Director Técnico - PQI - 560

Fin del Reporte

 <p>CYANAM S.A.S. Consultoría y Análisis Ambiental S.A.S</p>	GC-F-017 V03 REPORTE DE RESULTADOS 2154-22	 <p>IDEAM Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales Resolución 1519 del 07 de diciembre de 2021</p>
--	--	--

EMPRESA	MANUELITA PEÑA ROJAS	ID MUESTRA	2154-22
DIRECCION	CALLE 134 BIS # 19-35	FECHA TOMA MUESTRA	2022-04-14
TELEFONO	313 4127053	FECHA INGRESO MUESTRA	2022-05-06
CONTACTO	MANUELITA PEÑA ROJAS	RESPONSABLE MUESTREO	cliente
NIT	NR	SITIO MUESTREO	Vertimiento canal de Vargas (piscina)
E-MAIL	samantha.urrego@estudiantes.uamerica.edu.co	TIPO MUESTRA	Agua superficial
FECHA DE INFORME	2022-05-17	TIPO MUESTREO	Puntual hora: 9:21 Am

RESULTADOS DE ANALISIS DE LABORATORIO Y MEDICIONES EN SITIO								
FECHA ANALISIS (AAAA-MM-DD)	VARIABLE	METODO / TÉCNICA	UNIDAD	LC	RESULTADOS	INCERTIDUMBRE	NORMATIVIDAD	CONFORMIDAD
2022-05-09	Cloruros	S.M. 4500 - Cl - B - Método Argentometría	mgCl / L	5	6175	0,12	NA	NR
2022-05-09	Sulfatos	S.M. 4500-SO ₄ E Método turbidímetro	mg/L SO ₄	10	2408	0,20	NA	NR

¹LC: Límite de cuantificación ²Parámetros de medición en sitio ³Parámetros subcontratados NA: No Aplica NR: No reporta La variable de DBO5 fue analizada a 20±3°C

NOTA IMPORTANTE: SE REPORTA VALOR REAL A SOLICITUD DEL CLIENTE PARA PROYECTO DE GRADO

Los resultados consignados se relacionan únicamente con la muestra sometida a ensayo ID 2154-22
Prohibida la reproducción parcial o total de este informe sin autorización del cliente y/o CYANAM SAS
Análisis realizados en las instalaciones de CYANAM SAS de acuerdo a los lineamientos de American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Edición 23.



Dennys Alejandra Samacá Ch.
Director de Calidad - R.P. 15625



Blanca Samacá Ch.
Director Técnico - PQI - 560

Fin del Reporte

 <p>CYANAM S.A.S Consultoría y Análisis Ambiental S.A.S</p>	<p>GC-F-017 V03 REPORTE DE RESULTADOS 2157-22</p>	 <p>IDEAM Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales <i>Resolución 1519 del 07 de diciembre de 2021</i></p>
---	---	---

EMPRESA	MANUELITA PEÑA ROJAS	ID MUESTRA	2157-22
DIRECCION	CALLE 134 BIS # 19-35	FECHA TOMA MUESTRA	2022-04-15
TELEFONO	313 4127053	FECHA INGRESO MUESTRA	2022-05-06
CONTACTO	MANUELITA PEÑA ROJAS	RESPONSABLE MUESTREO	cliente
NIT	NR	SITIO MUESTREO	Vertimiento canal de Vargas (piscina)
E-MAIL	samantha.urrego@estudiantes.uamerica.edu.co	TIPO MUESTRA	Agua superficial
FECHA DE INFORME	2022-05-17	TIPO MUESTREO	Puntual hora: 14:30

RESULTADOS DE ANALISIS DE LABORATORIO Y MEDICIONES EN SITIO								
FECHA ANALISIS (AAAA-MM-DD)	VARIABLE	METODO / TÉCNICA	UNIDAD	LC	RESULTADOS	INCERTIDUMBRE	NORMATIVIDAD	CONFORMIDAD
2022-05-09	Cloruros	S.M. 4500 - Cl - B - Método Argentometría	mgCl / L	5	5642	0,12	NA	NR
2022-05-09	Sulfatos	S.M. 4500-SO ₄ E Método turbidímetro	mg/L SO ₄	10	4957	0,20	NA	NR

LC: Límite de cuantificación *Parámetros de medición en sitio †Parámetros subcontratados NA: No Aplica NR: No reporta La variable de DBO5 fue analizada a 20±3°C

NOTA IMPORTANTE: SE REPORTA VALOR REAL A SOLICITUD DEL CLIENTE PARA PROYECTO DE GRADO

Los resultados consignados se relacionan únicamente con la muestra sometida a ensayo ID 2157-22
Prohibida la reproducción parcial o total de este informe sin autorización del cliente y/o CYANAM SAS
Análisis realizados en las instalaciones de CYANAM SAS de acuerdo a los lineamientos de American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Edition 23.



Dennys Alejandra Samacá Ch.
Director de Calidad - R.P. 15625



Blanca Samacá Ch.
Director Técnico - PQI - 560

Fin del Reporte

 Consultoría y Análisis Ambiental S.A.S	GC-F-017 V03 REPORTE DE RESULTADOS 2156-22	 Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales Resolución 1519 del 07 de diciembre de 2021
---	--	--

EMPRESA	MANUELITA PEÑA ROJAS	ID MUESTRA	2156-22
DIRECCION	CALLE 134 BIS # 19-35	FECHA TOMA MUESTRA	2022-04-15
TELEFONO	313 4127053	FECHA INGRESO MUESTRA	2022-05-06
CONTACTO	MANUELITA PEÑA ROJAS	RESPONSABLE MUESTREO	cliente
NIT	NR	SITIO MUESTREO	Vertimiento canal de Vargas (piscina)
E-MAIL	samantha.urrego@estudiantes.uamerica.edu.co	TIPO MUESTRA	Agua superficial
FECHA DE INFORME	2022-05-17	TIPO MUESTREO	Puntual hora: 10:30

RESULTADOS DE ANALISIS DE LABORATORIO Y MEDICIONES EN SITIO								
FECHA ANALISIS (AAAA-MM-DD)	VARIABLE	METODO / TÉCNICA	UNIDAD	LC	RESULTADOS	INCERTIDUMBRE	NORMATIVIDAD	CONFORMIDAD
2022-05-09	Cloruros	S.M. 4500 - Cl - B - Método Argentometría	mgCl / L	5	4725	0,12	NA	NR
2022-05-09	Sulfatos	S.M. 4500-SO ₄ E Método turbidímetro	mg/L SO ₄	10	4945	0,20	NA	NR

LC: Límite de cuantificación *Parámetros de medición en sitio **Parámetros subcontratados NA: No Aplica NR: No reporta La variable de DBO5 fue analizada a 20±3°C

NOTA IMPORTANTE: SE REPORTA VALOR REAL A SOLICITUD DEL CLIENTE PARA PROYECTO DE GRADO

Los resultados consignados se relacionan únicamente con la muestra sometida a ensayo ID 2156-22
 Prohibida la reproducción parcial o total de este informe sin autorización del cliente y/o CYANAM SAS
 Análisis realizados en las instalaciones de CYANAM SAS de acuerdo a los lineamientos de American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Edition 23.



Dennys Alejandra Samacá Ch.
 Director de Calidad - R.P. 15625



Blanca Samacá Ch.
 Director Técnico - PQI - 560

Fin del Reporte

 Consultoría y Análisis Ambiental S.A.S	GC-F-017 V03 REPORTE DE RESULTADOS 2158-22	 Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales Resolución 1519 del 07 de diciembre de 2021
---	--	--

EMPRESA	MANUELITA PEÑA ROJAS	ID MUESTRA	2157-22
DIRECCION	CALLE 134 BIS # 19-35	FECHA TOMA MUESTRA	2022-04-13
TELEFONO	313 4127053	FECHA INGRESO MUESTRA	2022-05-06
CONTACTO	MANUELITA PEÑA ROJAS	RESPONSABLE MUESTREO	cliente
NIT	NR	SITIO MUESTREO	Vertimiento canal de Vargas (piscina)
E-MAIL	samantha.urrego@estudiantes.uamerica.edu.co	TIPO MUESTRA	Agua superficial
FECHA DE INFORME	2022-05-17	TIPO MUESTREO	Puntual hora: 17:10

RESULTADOS DE ANALISIS DE LABORATORIO Y MEDICIONES EN SITIO								
FECHA ANALISIS (AAAA-MM-DD)	VARIABLE	METODO / TÉCNICA	UNIDAD	LC	RESULTADOS	INCERTIDUMBRE	NORMATIVIDAD	CONFORMIDAD
2022-05-09	Cloruros	S.M. 4500 - Cl -B - Método Argentó métrico	mgCl / L	5	6625	0,12	NA	NR
2022-05-09	Sulfatos	S.M. 4500-SO ₄ E Método turbidímetro	mg/L SO ₄	10	4645	0,20	NA	NR

LC: Límite de cuantificación *Parámetros de medición en sitio **Parámetros subcontratados NA: No Aplica NR: No reporta La variable de DBO5 fue analizada a 20±3°C

NOTA IMPORTANTE: SE REPORTA VALOR REAL A SOLICITUD DEL CLIENTE PARA PROYECTO DE GRADO

Los resultados consignados se relacionan únicamente con la muestra sometida a ensayo ID 2158-22
 Prohibida la reproducción parcial o total de este informe sin autorización del cliente y/o CYANAM SAS
 Análisis realizados en las instalaciones de CYANAM SAS de acuerdo a los lineamientos de American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Edition 23.



Dennys Alejandra Samacá Ch.
 Director de Calidad - R.P. 15625



Blanca Samacá Ch.
 Director Técnico - PQI - 560

Fin del Reporte

 Consultoría y Análisis Ambiental S.A.S.	GC-F-017 V03 REPORTE DE RESULTADOS 2159-22	 Instituto de Investigación, Monitoreo y Estudios Ambientales Resolución 1519 del 07 de diciembre de 2021
--	--	--

EMPRESA	MANUELITA PEÑA ROJAS	ID MUESTRA	2159-22
DIRECCION	CALLE 134 BIS # 19-35	FECHA TOMA MUESTRA	2022-04-15
TELEFONO	313 4127053	FECHA INGRESO MUESTRA	2022-05-06
CONTACTO	MANUELITA PEÑA ROJAS	RESPONSABLE MUESTREO	cliente
NIT	NR	SITIO MUESTREO	Vertimiento canal de Vargas (piscina)
E-MAIL	samantha.urrego@estudiantes.uamerica.edu.co	TIPO MUESTRA	Agua superficial
FECHA DE INFORME	2022-05-17	TIPO MUESTREO	Puntual hora: 10:00

RESULTADOS DE ANALISIS DE LABORATORIO Y MEDICIONES EN SITIO								
FECHA ANALISIS (AAAA-MM-DD)	VARIABLE	METODO / TÉCNICA	UNIDAD	LC	RESULTADOS	INCERTIDUMBRE	NORMATIVIDAD	CONFORMIDAD
2022-05-09	Cloruros	S.M. 4500 - Cl - B - Método Argentometría	mgCl / L	5	6625	0,12	NA	NR
2022-05-09	Sulfatos	S.M. 4500-SO ₄ E Método turbidímetro	mg/L SO ₄	10	4645	0,20	NA	NR

LC: Límite de cuantificación ²Parámetros de medición en sitio ³Parámetros subcontratados NA: No Aplica NR: No reporta La variable de DBO5 fue analizada a 20±3°C

NOTA IMPORTANTE: SE REPORTA VALOR REAL A SOLICITUD DEL CLIENTE PARA PROYECTO DE GRADO

Los resultados consignados se relacionan únicamente con la muestra sometida a ensayo ID 2159-22
 Prohibida la reproducción parcial o total de este informe sin autorización del cliente y/o CYANAM SAS
 Análisis realizados en las instalaciones de CYANAM SAS de acuerdo a los lineamientos de American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Edition 23.




Denny Alejandra Samacá Ch.
 Director de Calidad - R.P. 15625



Blanca Samacá Ch.
 Director Técnico - PQI - 560

Fin del Reporte

 <p>CYANAM S.A.S Consultoría y Análisis Ambiental S.A.S</p>	<p>GC-F-017 V03 REPORTE DE RESULTADOS 2160-22</p>	 <p>IDEAM Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales <i>Resolución 1519 del 07 de diciembre de 2021</i></p>
---	---	---

EMPRESA	MANUELITA PEÑA ROJAS	ID MUESTRA	2160-22
DIRECCION	CALLE 134 BIS # 19-35	FECHA TOMA MUESTRA	2022-04-15
TELEFONO	313 4127053	FECHA INGRESO MUESTRA	2022-05-06
CONTACTO	MANUELITA PEÑA ROJAS	RESPONSABLE MUESTREO	cliente
NIT	NR	SITIO MUESTREO	Piscina
E-MAIL	samantha.urrego@estudiantes.uamerica.edu.co	TIPO MUESTRA	Agua superficial
FECHA DE INFORME	2022-05-17	TIPO MUESTREO	Puntual hora: 14:00

RESULTADOS DE ANALISIS DE LABORATORIO Y MEDICIONES EN SITIO								
FECHA ANALISIS (AAAA-MM-DD)	VARIABLE	METODO / TÉCNICA	UNIDAD	LC	RESULTADOS	INCERTIDUMBRE	NORMATIVIDAD	CONFORMIDAD
2022-05-09	Cloruros	S.M. 4500 - Cl - B - Método Argentó métrico	mgCl / L	5	5279	0,12	NA	NR
2022-05-09	Sulfatos	S.M. 4500-SO ₄ E Método turbidímetro	mg/L SO ₄	10	4727	0,20	NA	NR

¹LC: Límite de cuantificación ²Parámetros de medición en sitio ³Parámetros subcontratados NA: No Aplica NR: No reporta La variable de DBO5 fue analizada a 20±3°C

NOTA IMPORTANTE: SE REPORTA VALOR REAL A SOLICITUD DEL CLIENTE PARA PROYECTO DE GRADO

Los resultados consignados se relacionan únicamente con la muestra sometida a ensayo ID 2160-22
Prohibida la reproducción parcial o total de este informe sin autorización del cliente y/o CYANAM SAS
Análisis realizados en las instalaciones de CYANAM SAS de acuerdo a los lineamientos de American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Edition 23.



Dennys Alejandra Samacá Ch.
Director de Calidad - R.P. 15625



Blanca Samacá Ch.
Director Técnico - PQI - 560

Fin del Reporte

EMPRESA	MANUELITA PEÑA ROJAS	ID MUESTRA	2161-22
DIRECCION	CALLE 134 BIS # 19-35	FECHA TOMA MUESTRA	2022-04-13
TELEFONO	313 4127053	FECHA INGRESO MUESTRA	2022-05-06
CONTACTO	MANUELITA PEÑA ROJAS	RESPONSABLE MUESTREO	cliente
NIT	NR	SITIO MUESTREO	Piscina
E-MAIL	samantha.urrego@estudiantes.uamerica.edu.co	TIPO MUESTRA	Agua superficial
FECHA DE INFORME	2022-05-17	TIPO MUESTREO	Puntual hora: 18:00

RESULTADOS DE ANALISIS DE LABORATORIO Y MEDICIONES EN SITIO								
FECHA ANALISIS (AAAA-MM-DD)	VARIABLE	METODO / TÉCNICA	UNIDAD	LC	RESULTADOS	INCERTIDUMBRE	NORMATIVIDAD	CONFORMIDAD
2022-05-09	Cloruros	S.M. 4500 - Cl -B - Método Argentometría	mgCl / L	5	6894	0,12	NA	NR
2022-05-09	Sulfatos	S.M. 4500-SO ₄ E Método turbidímetro	mg/L SO ₄	10	5139	0,20	NA	NR

¹LC: Límite de cuantificación ²Parámetros de medición en sitio ³Parámetros subcontratados NA: No Aplica NR: No reporta La variable de DBO5 fue analizada a 20±3°C

NOTA IMPORTANTE: SE REPORTA VALOR REAL A SOLICITUD DEL CLIENTE PARA PROYECTO DE GRADO

Los resultados consignados se relacionan únicamente con la muestra sometida a ensayo ID 2161-22
Prohibida la reproducción parcial o total de este informe sin autorización del cliente y/o CYANAM SAS
Análisis realizados en las instalaciones de CYANAM SAS de acuerdo a los lineamientos de American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Edition 23.





Dennys Alejandra Samacá Ch.
Director de Calidad - R.P. 15625



Blanca Samacá Ch.
Director Técnico - PQI - 560

Fin del Reporte

 Consultoría y Análisis Ambiental S.A.S	GC-F-017 V03 REPORTE DE RESULTADOS 2163-22	 Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales Resolución 1519 del 07 de diciembre de 2021
---	--	--

EMPRESA	MANUELITA PEÑA ROJAS	ID MUESTRA	2163-22
DIRECCION	CALLE 134 BIS # 19-35	FECHA TOMA MUESTRA	2022-04-14
TELEFONO	313 4127053	FECHA INGRESO MUESTRA	2022-05-06
CONTACTO	MANUELITA PEÑA ROJAS	RESPONSABLE MUESTREO	cliente
NIT	NR	SITIO MUESTREO	Nacimiento pozo azul
E-MAIL	samantha.urrego@estudiantes.uamerica.edu.co	TIPO MUESTRA	Agua superficial
FECHA DE INFORME	2022-05-17	TIPO MUESTREO	Puntual hora: 14:10

RESULTADOS DE ANALISIS DE LABORATORIO Y MEDICIONES EN SITIO								
FECHA ANALISIS (AAAA-MM-DD)	VARIABLE	METODO / TÉCNICA	UNIDAD	LC	RESULTADOS	INCERTIDUMBRE	NORMATIVIDAD	CONFORMIDAD
2022-05-09	Cloruros	S.M. 4500 - Cl - B - Método Argentometría	mgCl / L	5	6361	0,12	NA	NR
2022-05-09	Sulfatos	S.M. 4500-SO ₄ E Método turbidímetro	mg/L SO ₄	10	5103	0,20	NA	NR

¹LC: Límite de cuantificación ²Parámetros de medición en sitio ³Parámetros subcontratados NA: No Aplica NR: No reporta La variable de DBO5 fue analizada a 20±3°C

NOTA IMPORTANTE: SE REPORTA VALOR REAL A SOLICITUD DEL CLIENTE PARA PROYECTO DE GRADO

Los resultados consignados se relacionan únicamente con la muestra sometida a ensayo ID 2163-22
 Prohibida la reproducción parcial o total de este informe sin autorización del cliente y/o CYANAM SAS
 Análisis realizados en las instalaciones de CYANAM SAS de acuerdo a los lineamientos de American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Edition 23.



Dennys Alejandra Samacá Ch.
 Director de Calidad - R.P. 15625



Blanca Samacá Ch.
 Director Técnico - PQI - 560

Fin del Reporte

EMPRESA	MANUELITA PEÑA ROJAS	ID MUESTRA	2164-22
DIRECCION	CALLE 134 BIS # 19-35	FECHA TOMA MUESTRA	2022-04-14
TELEFONO	313 4127053	FECHA INGRESO MUESTRA	2022-05-06
CONTACTO	MANUELITA PEÑA ROJAS	RESPONSABLE MUESTREO	cliente
NIT	NR	SITIO MUESTREO	Nacimiento pozo azul
E-MAIL	samantha.urrego@estudiantes.uamerica.edu.co	TIPO MUESTRA	Agua superficial
FECHA DE INFORME	2022-05-17	TIPO MUESTREO	Puntual hora: 18:20

RESULTADOS DE ANALISIS DE LABORATORIO Y MEDICIONES EN SITIO								
FECHA ANALISIS (AAAA-MM-DD)	VARIABLE	METODO / TÉCNICA	UNIDAD	LC	RESULTADOS	INCERTIDUMBRE	NORMATIVIDAD	CONFORMIDAD
2022-05-09	Cloruros	S.M. 4500 - Cl - B - Método Argentometría	mgCl / L	5	6087	0,12	NA	NR
2022-05-09	Sulfatos	S.M. 4500-SO ₄ E Método turbidímetro	mg/L SO ₄	10	4763	0,20	NA	NR

¹LC: Límite de cuantificación ²Parámetros de medición en sitio ³Parámetros subcontratados NA: No Aplica NR: No reporta La variable de DBO5 fue analizada a 20±3°C

NOTA IMPORTANTE: SE REPORTA VALOR REAL A SOLICITUD DEL CLIENTE PARA PROYECTO DE GRADO

Los resultados consignados se relacionan únicamente con la muestra sometida a ensayo ID 2164-22
 Prohibida la reproducción parcial o total de este informe sin autorización del cliente y/o CYANAM SAS
 Análisis realizados en las instalaciones de CYANAM SAS de acuerdo a los lineamientos de American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Edition 23.



Dennys Alejandra Samacá Ch.
 Director de Calidad - R.P. 15625



Blanca Samacá Ch.
 Director Técnico - PQI - 560

Fin del Reporte