



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

**Diseño y elaboración de un filtro a base de arcilla y carbón activo usando almidón de bore (alocasia macrorrhiza) como floculante para la purificación de agua de nacimiento proveniente de la vereda Sipirra del municipio de Riosucio Caldas.**

**Ebelin Daniela Ramírez Hernández**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Física y Química  
Manizales, Colombia  
2023



**Diseño y elaboración de un filtro a base de arcilla y carbón activo usando almidón de bore (alocasia macrorrhiza) como floculante para la purificación de agua de nacimiento proveniente de la vereda Sipirra del municipio de Riosucio Caldas.**

**Ebelin Daniela Ramírez Hernández**

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título  
de:

**Magister en Ciencias- Física**

Director (a):

Dra. Posidia Pineda Gómez

Línea de Investigación:

Materiales Avanzados

Grupo de Investigación:

Magnetismo y Materiales Avanzados

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Física y Química

Manizales, Colombia

2023



*A Dios*

*A mis padres, Laura y Helver*

*A mi abuela Soledad.*



## Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



---

Ebelin Daniela Ramirez Hernandez

01/08/2023

## **Agradecimientos**

En primer lugar, quiero agradecer a Dios, y a mi familia que siempre me han brindado su apoyo incondicional para poder cumplir todos mis objetivos personales y académicos. Ellos son los que con su cariño me han impulsado siempre a perseguir mis metas, y a creer siempre en mí. Gracias a mi madre Laura Hernandez, a mi padre Helver Ramirez y a mis hermanas Mayerly y Esmeralda por su amor, apoyo y paciencia incondicional. Deseo agradecer a mis tíos Arelis y Hernando por su valiosa ayuda durante todos mis años de formación académica. Gracias a mi abuela por siempre estar pendiente de mi durante todos estos años.

A Mateo Ramirez quiero agradecerle por su paciencia, amor, comprensión y acompañamiento durante todos estos años, también quiero agradecerle por sus aportes, colaboración y enseñanzas como ingeniero agrónomo durante todo el proceso investigativo.

De igual manera quiero agradecerle a mi profesora y tutora Posidia Pineda por el acompañamiento académico, por siempre estar pendiente de mí y de que la investigación se realizara de manera adecuada, por la constante motivación, por su apoyo y confianza en este proceso.

Al profesor Andrés Rosales por haberme dado la oportunidad de entrar al Laboratorio de Magnetismo y Materiales Avanzados, por brindarme un espacio para investigar. También quiero agradecerles a mis colegas y compañeros de estudio Silvia Londoño y Duván Fuquen por sus valiosas contribuciones y enseñanzas.

Al Profesor Daniel Ricardo Toro, director del programa de Biología de la Universidad de Caldas, por su colaboración en el análisis de las muestras en el laboratorio de investigación en microbiología.

Quiero agradecer a los profesores Oscar Hernán Giraldo, Sneyder Rodríguez Barona y María Fanny Ocampo por los espacios brindados para realizar diversas pruebas y caracterizaciones; al laboratorio de física del plasma, al laboratorio de procesos productivos, al laboratorio de aguas, y al Laboratorio de química de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales, por los espacios, análisis y equipos facilitados para poder cumplir con todos los objetivos propuestos.

Por último, agradecer a la Universidad Nacional de Colombia que me ha exigido tanto, pero al mismo tiempo me ha permitido formarme como ingeniera y magister. Agradezco a cada directivo y docente por su trabajo y por su gestión, sin lo cual no hubiesen estado las bases ni las condiciones para cumplir mis objetivos.



## Resumen

### **Diseño y elaboración de un filtro a base de arcilla y carbón activo usando almidón de bore (*alocasia macrorrhiza*) como floculante para la purificación de agua de nacimiento proveniente de la vereda Sipirra del municipio de Riosucio Caldas.**

El constante deterioro de los ecosistemas y de las fuentes hídricas como recurso para abastecimiento de agua, ha llevado a la búsqueda de nuevos procesos y técnicas de potabilización que sean de bajo costo y con las cuales se pueda obtener agua segura con el menor riesgo posible de afectaciones a la salud. El objetivo de esta investigación fue potabilizar agua de nacimiento mediante la elaboración de un filtro a base de arcilla y carbón activado, previo tratamiento de floculación con almidón de bore (*Alocasia Macrorrhiza*), con el fin de mejorar la calidad de vida de los habitantes de la vereda Sipirra del municipio de Riosucio Caldas. Para lograr el objetivo de la investigación se modificó el almidón mediante acetilación y se realizaron pruebas de jarras para determinar la dosis adecuada de floculante y así lograr la remoción de turbidez y color del agua. Además, se fabricó un prototipo de filtro a partir de una vasija de arcilla elaborada artesanalmente y carbón activado granular que se dispusieron en un tanque por el cual se pasó el agua que había sido tratada previamente con el almidón de bore modificado. También se planteó realizar caracterizaciones de los diferentes elementos a utilizar en la investigación, como lo son el agua antes y después del tratamiento, el almidón nativo y modificado, mediante, Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), Difracción de rayos x (XRD), Microscopía electrónica de barrido (SEM), Análisis termo gravimétrico (TGA) y Calorimetría diferencial de barrido (DSC). Finalmente se estableció que el almidón de bore es un buen floculante, ya que se logró remover la turbidez del agua en un 41%, además de que el uso del filtro de arcilla y carbón activado es efectivo en la eliminación de bacterias nocivas para el ser humano; por lo que el agua obtenida cumple con lo estipulado en la

resolución 2115 del 2007, donde se establecen los parámetros y lineamientos básicos para la determinación del agua potable.

**Palabras clave: (Bore, Alocasia Macrorrhiza, Almidón, Carbón activado, Filtración, Arcilla, Potabilización).**

# Abstract

**Design and development of a filter based on clay and activated carbon using bore starch (*Alocasia macrorrhiza*) as flocculant for the purification of spring water from the Sipirra village in the municipality of Riosucio Caldas.**

The constant deterioration of ecosystems and water sources as a resource for water supply, has led to the search for new processes and techniques of potabilization that are low cost and with which safe water can be obtained with the lowest possible risk of health effects. The objective of this research was to make spring water drinkable through the elaboration of a filter based on clay and activated carbon, after flocculation treatment with bore starch (*Alocasia Macrorrhiza*), in order to improve the quality of life of the inhabitants of the Sipirra village in the municipality of Riosucio, Caldas. To achieve the research objective, the starch was modified by acetylation and jar tests were carried out to determine the adequate dose of flocculant and thus achieve the removal of turbidity and color from the water. In addition, a prototype filter was fabricated from a handmade clay pot and granular activated carbon that were placed in a tank through which the water that had been previously treated with the modified bore starch was passed. It was also proposed to perform characterizations of the different elements to be used in the research, such as water before and after treatment, native and modified starch, by means of Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), X-Ray Diffraction (XRD), Scanning Electron Microscopy (SEM), Thermal Gravimetric Analysis (TGA) and Differential Scanning Calorimetry (DSC). Finally, it was established that bore starch is a good flocculant, as it was able to remove 41% of the turbidity from the water, and that the use of the clay filter and activated carbon is effective in eliminating bacteria harmful to humans; therefore, the water obtained complies with Resolution 2115 of 2007, which establishes the basic parameters and guidelines for determining drinking water.

**Keywords: (Bore, Alocasia Marcrorrhiza, Starch, Activated carbon, Filtration, Clay, Potabilization).**



# Contenido

	Pág.
<b>Resumen .....</b>	<b>XI</b>
<b>Lista de figuras.....</b>	<b>XVII</b>
<b>Lista de tablas .....</b>	<b>XVIII</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>2</b>
<b>1. Revisión del estado del arte y marco teórico.....</b>	<b>5</b>
1.1 Revisión del estado del arte .....	5
1.2 Marco teórico .....	12
1.2.1 Proceso de potabilización del agua.....	12
1.2.2 Prueba de jarras .....	14
1.2.3 Proceso de coagulación.....	15
1.2.4 Proceso de floculación y aplicación de floculantes naturales .....	16
1.2.5 Proceso de filtración en tratamiento de aguas .....	18
1.2.6 Arcilla.....	18
1.2.7 Carbón activado.....	20
1.2.8 Filtro de arcilla .....	22
1.2.9 Bore.....	23
1.2.10 Almidón .....	25
1.2.11 Modificación química del almidón por acetilación.....	29
1.3 Área problemática y preguntas de investigación .....	32
1.4 Justificación.....	33
1.5 Objetivos .....	35
1.5.1 Objetivo general.....	35
1.5.2 Objetivos específicos .....	35
<b>2. Desarrollo experimental.....</b>	<b>37</b>
2.1 Extracción del almidón .....	37
2.2 Modificación química del almidón .....	39
2.3 Prueba de jarras para floculación .....	39
2.4 Elaboración del prototipo de filtro de arcilla y carbón activado .....	41
2.5 Proceso de filtración del agua .....	42
2.6 Pruebas de caracterización .....	43
2.6.1 Pruebas fisicoquímicas del agua .....	43
2.6.2 Pruebas microbiológicas del agua .....	44
2.6.3 Microscopia electrónica de barrido (SEM).....	45
2.6.4 Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) .....	45

2.6.5	Difracción de rayos X (XRD).....	45
2.6.6	Solubilidad en polvos.....	45
2.6.7	Análisis termo gravimétrico (TGA).....	46
2.6.8	Calorimetría diferencial de barrido (DSC).....	46
<b>3.</b>	<b>Resultados .....</b>	<b>49</b>
3.1	Análisis de coagulación floculación para agua de nacimiento con prueba de jarras	49
3.2	Pruebas de efectividad del filtro de arcilla y carbón activado .....	56
3.3	Pruebas de caracterización fisicoquímicas del almidón .....	61
3.3.1	Análisis de morfología por microscopia electrónica de barrido (SEM) .....	61
3.3.2	Determinación de los grupos funcionales del almidón de bore mediante espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR).....	63
3.3.3	Estructura del almidón de bore, mediante difracción de rayos X (XRD).....	66
3.3.4	Solubilidad del almidón de bore.....	69
3.3.5	Degradación térmica del almidón de bore. Análisis por termogravimetría (TGA)	71
3.3.6	Gelatinización del almidón de bore. Calorimetría diferencial de barrido (DSC)	73
3.4	Evaluación del desempeño del prototipo de floculador y filtro .....	75
3.4.1	Desarrollo del prototipo de coagulador- floculador.....	75
<b>4.</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>79</b>
4.1	Conclusiones .....	79
4.2	Recomendaciones para trabajos futuros.....	81
<b>5.</b>	<b>Anexo. Contenido nutricional del almidón de bore .....</b>	<b>83</b>
<b>6.</b>	<b>Divulgación de los resultados .....</b>	<b>87</b>
<b>7.</b>	<b>Bibliografía .....</b>	<b>95</b>

## Lista de figuras

	Pág.
<b>Figura 1-1:</b> Proceso de coagulación- floculación, decantación. ....	16
<b>Figura 1-2:</b> Micrografías de carbón: Materia prima (A), carbón activado (B). ....	21
<b>Figura 1-3:</b> Representación del proceso de transporte y adsorción de contaminantes en el carbón activado. ....	21
<b>Figura 1-4:</b> Filtro de arcilla .....	22
<b>Figura 1-5:</b> Fotografía de las plantas del bore, Riosucio Caldas, comunidad de Sipirra.24	
<b>Figura 1-6:</b> Fotografía del corte del tallo del bore, Riosucio Caldas, comunidad de Sipirra.....	25
<b>Figura 1-7:</b> Organización de las cadenas de amilosa y amilopectina.....	26
<b>Figura 1-8:</b> imágenes SEM de diferentes fuentes de almidones. ....	27
<b>Figura 1-9:</b> Representación esquemática de la estructura del gránulo de almidón. ....	28
<b>Figura 1-10:</b> Reacción química por acetilación del almidón. ....	31
<b>Figura 2-1:</b> Diagrama de flujo de la metodología empleada.....	37
<b>Figura 2-2:</b> Proceso de obtención del almidón de bore.....	38
<b>Figura 2-3:</b> Proceso de acetilación del almidón de bore. ....	39
<b>Figura 2-4:</b> Proceso de coagulación y floculación en equipo de jarras.....	41
<b>Figura 2-5:</b> Prototipo del sistema de filtración. ....	42
<b>Figura 2-6:</b> Diseño del esquema de tratamiento del agua: Floculador, y filtro de arcilla-carbón activado.....	43
<b>Figura 3-1:</b> A) Micrografía almidón de bore nativo. B) Micrografía almidón de bore acetilado.....	63
<b>Figura 3-2:</b> A) FTIR del almidón de bore y B) ampliación de las bandas modificadas... 65	
<b>Figura 3-3:</b> Difractograma del almidón de bore nativo y modificado.....	68
<b>Figura 3-4:</b> Termogramas TGA de almidón de bore nativo y modificado. ....	72
<b>Figura 3-5:</b> Análisis termogravimétrico DSC para el almidón de bore nativo.....	74
<b>Figura 3-6:</b> Diseño y montaje de prototipo de coagulador-floculador a escala. Sistema de filtración.....	75
<b>Figura 3-7:</b> Montaje en sitio del sistema de tratamiento de aguas, con floculador a escala y filtro de arcilla y carbón activado.....	77

## Lista de tablas

	Pág.
<b>Tabla 1-1:</b> Propiedades de almidones obtenidos de diferentes materias primas.....	6
<b>Tabla 1-2:</b> Clasificación biológica del Bore ( <i>Alocasia Macrorrhiza</i> ).....	23
<b>Tabla 2-1:</b> Determinación y métodos de medición de los parámetros fisicoquímicos del agua natural y tratada. ....	44
<b>Tabla 3-1:</b> Características iniciales del agua. ....	50
<b>Tabla 3-2:</b> Variación de la turbidez y el pH a diferentes dosis de coagulante. ....	50
<b>Tabla 3-3:</b> Determinación de la dosis óptima de floculante de acuerdo con la variación de la turbidez del agua filtrada y no filtrada. ....	51
<b>Tabla 3-4:</b> Determinación de la dosis óptima de floculante de acuerdo con la variación de la turbidez del agua filtrada y no filtrada. ....	51
<b>Tabla 3-5:</b> Características iniciales del agua proveniente de la quebrada Manizales.....	52
<b>Tabla 3-6:</b> Comportamiento de la turbidez y el pH con diferentes dosis de coagulante. .	53
<b>Tabla 3-7:</b> Comportamiento de la turbidez bajo diferentes dosis de floculante. ....	54
<b>Tabla 3-8:</b> Variación del pH bajo diferentes dosis de floculante. ....	54
<b>Tabla 3-9:</b> Comportamiento de la conductividad eléctrica a diferentes concentraciones de pH.....	55
<b>Tabla 3-10:</b> Cambio de la demanda química de oxígeno y del color aparente. ....	56
<b>Tabla 3-11:</b> Pruebas fisicoquímicas del agua después del proceso de filtración con arcilla y carbón activado.....	56
<b>Tabla 3-12:</b> Caracterización microbiológica del agua después del tratamiento de filtración con arcilla y carbón activado. ....	57
<b>Tabla 3-13:</b> Bandas específicas de los almidones en el espectro FTIR. ....	64
<b>Tabla 3-14:</b> Porcentaje de solubilidad de las muestras de almidón.....	70
<b>Tabla 5-1:</b> Análisis químico del almidón de bore (% en base húmeda).....	83
<b>Tabla 5-2:</b> Contenido mineral del almidón de bore medido en mg/100g .....	83
<b>Tabla 5-3:</b> Contenido de almidón presente en diferentes tipos de biomasa. ....	85



# Introducción

En los últimos años, se ha observado un aumento significativo en la adopción de diversos métodos para el tratamiento del agua destinada al consumo doméstico. Este fenómeno se atribuye a la imperante necesidad de garantizar un acceso seguro a este recurso, especialmente debido a los elevados niveles de escasez de líquido que se manifiestan durante las estaciones secas en diversas regiones del país. Este desafío se evidencia de manera más acuciante en las áreas rurales, donde la falta de infraestructuras de tratamiento suele obligar a recurrir a fuentes como pozos, nacimientos de agua, ríos, entre otros. En el ámbito del servicio público domiciliario de acueducto, el CONPES 3918 - Estrategia para la implementación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en Colombia proporciona datos reveladores. Según este documento, la cobertura de acceso al agua potable en suelo urbano alcanzó un destacado 97,4% en el año 2017. Sin embargo, en las áreas rurales, esta cifra fue del 73,2%, resultando en una cobertura nacional total del 92,4% [1].

La clarificación es una de las etapas más importantes durante el proceso de potabilización de las aguas, ya que en esta se logra una significativa eliminación de partículas en suspensión, además de presentar buenos porcentajes de remoción en cuanto al color, olor y sabor. Para lograr la clarificación del agua, es necesaria la utilización de agentes

coagulantes, así como coadyuvantes de coagulación, que permiten eliminar un porcentaje significativo de las partículas en suspensión (típicamente entre 80 y 90%); este proceso es conocido como coagulación-floculación [2]. En el proceso de coagulación floculación generalmente se usan sales metálicas, como el sulfato de aluminio y el sulfato ferroso. La dosis óptima de este agente químico se determina mediante un proceso de prueba de jarras; pero debido al alto costo de estos químicos, y a sus efectos adversos a la salud y conservación del medio cuando no se realiza un adecuado manejo de estos agentes químicos, por lo cual ambiente se ha optado por el uso de biopolímeros como el almidón modificado, ya que este proviene de una fuente natural y puede disminuir los costos de tratamiento del agua. La filtración juega un papel muy importante en el tratamiento de potabilización del agua en zonas rurales, por su eficacia, facilidad de implementación y uso. Los filtros reducen número de bacterias, turbidez, y protozoarios dañinos para la salud. Estos filtros tradicionalmente fabricados de arcilla (principalmente bentonítica y diatomea), también se encuentran fabricados con algunas variaciones y mezclas en sus componentes de acuerdo con las necesidades de filtración, como lo son el tamaño de poro y velocidad de filtración. El uso de la arcilla como material de fabricación garantiza un tamaño de poro adecuado para la eliminación de agentes extraños y nocivos. Otro método de filtración muy efectivo en la eliminación de bacterias es el método de filtración con carbón activo, ya que éste atrapa todo tipo de contaminantes orgánicos en sus paredes, y puede dejar un agua completamente libre de productos nocivos para el ser humano.

Esta investigación busca el mejoramiento de la calidad de vida de los habitantes de la vereda Sipirra del municipio de Riosucio Caldas, ya que esta población no cuenta con acceso a agua potable y mucho menos a una planta de tratamiento que pueda ayudar a suplir sus necesidades, por esta razón todas las familias se ven obligadas a consumir el agua proveniente de diversos nacimientos. La vereda cuenta con un acueducto comunitario y varios tanques de almacenamiento que recolectan el agua de los nacimientos. El agua que llega a cada hogar no tiene un tratamiento previo que permita su consumo seguro, por lo tanto, con esta investigación se pretendió potabilizar agua de nacimiento mediante la elaboración de un filtro a base de arcilla y carbón activado, previo tratamiento de floculación con almidón de bore, además de evaluar la eficiencia del almidón de bore modificado, de la arcilla y el carbón activado como insumos en el tratamiento de aguas de nacimiento para su posible consumo en humanos.

En este documento se presentan en una forma secuencial los resultados obtenidos. En el capítulo 1 se hace una revisión de antecedentes y estudio del estado de arte, acompañado de un marco teórico orientado a delimitar el tema objeto de estudio y culmina con la justificación, identificación del problema y objetivos propuestos en la investigación. En el capítulo 2, se presenta el desarrollo experimental que explica técnicas y procedimientos realizados en la producción de muestras, prototipos y su caracterización. El capítulo 3 presenta los resultados obtenidos en cuanto a la evaluación de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua después de haber sido filtrada mediante arcilla y carbón, la determinación de la dosificación del floculante, continuando con la caracterización fisicoquímica de los almidones de bore (nativo y modificado), para finalizar con la evaluación y presentación del prototipo de filtro. Finalmente se presentan en el capítulo 4 las conclusiones y recomendaciones derivadas de este trabajo de investigación.

# 1. Revisión del estado del arte y marco teórico

## 1.1 Revisión del estado del arte

El uso de coagulantes naturales para la purificación de agua se ha venido estudiando y aplicando en investigaciones que buscan mejorar las condiciones de distintos tipos de aguas, con el fin de reducir el uso de agentes químicos y posibles efectos adversos en la salud. Desde los años 60, se han generado varias discusiones sobre los efectos del aluminio en el cuerpo humano. Algunos estudios proponen una relación entre el aluminio presente en el agua potable y enfermedades como Alzheimer y Parkinson, pero sin embargo esto es todavía objeto de discusión y constante investigación para la comprobación de esta correlación [3].

Se han reportado diversos estudios en los cuales se usa almidón de fuentes naturales como floculante, de aquí la importancia de evaluar la factibilidad de usar almidón bore como floculante para el tratamiento de las aguas basándonos en la eficiencia de este en la disminución de parámetros básicos como color y turbidez. Durante los últimos años, gran variedad de estudios ha permitido identificar la potencialidad de distintas plantas para este propósito, en especial tubérculos y cereales que permiten disminuir el uso de sustancias químicas sintéticas y mejorar la relación costo beneficio de este proceso.

Solís et al. 2012 [2], compararon mezclas con potencial coagulante compuestas por almidón de yuca (*Manihot esculenta Crantz*) y sulfato de aluminio grado comercial, que permitirían reducir la cantidad de este último usado en plantas de tratamiento de agua. Mediante prueba de jarras determinaron la mejor dosis del sulfato de aluminio, a partir de esta se plantearon seis mezclas con distintas composiciones de almidón y sulfato de aluminio, con el fin de medir el color, la turbiedad y el pH. Los resultados indican que la mayor reducción de color (94 % de eficiencia) se obtuvo con la composición que contenía

2 mg/L de almidón de yuca más 28 mg/L de sulfato de aluminio; En cuanto a la remoción de turbiedad se observa que este tratamiento brinda una reducción del 97.9%; finalmente, el pH no presentó variaciones significativas entre los tratamientos.

Trujillo et al. 2014 [4] , analizaron la remoción de turbiedad en agua proveniente de una fuente natural, mediante coagulación floculación usando almidón de plátano (*Musa x paradisiaca*). Se realizaron pruebas de jarras para determinar los valores óptimos del pH, la dosis de coagulante, la velocidad de mezcla rápida y mezcla lenta. Se comprobó que el almidón de plátano es adecuado como ayudante en la floculación, aunque este presentó una sedimentación lenta. La mejor eficiencia de remoción de turbiedad se obtuvo para los siguientes valores de los factores: pH de 5, 50:50 porcentaje en peso de la combinación sulfato de aluminio/almidón de plátano, velocidad de mezcla rápida de 150 rpm, velocidad de mezcla lenta de 20 rpm.

Arias. 2016 [5], obtuvo almidón de la *Alocasia Macrorrhiza* (Bore) a nivel de laboratorio y realizó la cuantificación del oxalato de calcio contenido en el almidón. Los tallos de Bore fueron limpiados, liofilizados y posteriormente molidos. Después se realizaron ensayos de gelatinización mediante los cuales se determinó que, a 40,5°C, el almidón empieza a perder su estructura. Para la obtención del almidón, se tomaron en cuenta dos formas físicas del tallo del Bore, la primera fue mediante el material rayado, y la segunda a partir de harina, realizando una variación de la temperatura para cada uno entre 20 a 38°C. Los resultados obtenidos indicaron que las condiciones óptimas para la obtención del almidón son a partir de la harina a una temperatura de 38°C ya que el contenido de oxalato de calcio a estas condiciones es de 29,56 mg/100g de muestra. También reportan una tabla (tabla 1-1) con la comparación en la cantidad del almidón de la *Alocasia Macrorrhiza* respecto a otras especies:

**Tabla 1-1:** Propiedades de almidones obtenidos de diferentes materias primas.

Especie	Almidón %(g/100g)	Temperatura de gelatinización °C	Humedad %(g/100g)
Bore	77.5	40-78	8.11
Yuca	87.8	54-66	13
Papa	66.2	56-66	19
Maíz	71	70-80	13

Fuente: Arias (2016). [5]

Ortiz et al. 2018 [6] evaluaron la eficiencia en la remoción de turbidez y color de un agua residual doméstica, en la cual se aplicó un tratamiento de coagulación-floculación agregando almidón de yuca (*Manihot esculenta Crantz*) combinado con coagulantes como  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{FeCl}_3$  y  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . La combinación que presentó la mayor eficiencia fue la combinación de 250 mg/L  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  y 750 mg/L del almidón con la cual se logró remover 75% de la turbiedad y 78% del color. La segunda mezcla fue de 250 mgL<sup>-1</sup> de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y 250 mgL<sup>-1</sup> de almidón, presento una remoción del 34.3% de turbiedad y 67.6% del color.

Chávez et al. 2019 [7] Obtuvieron y evaluaron a nivel laboratorio almidón de plátano de seda (*Musa acuminata AAA*), como coagulante – floculante para el tratamiento de agua recolectada del río Puchca, el cual está ubicado en el departamento de Ancash – Perú. Se extrajo el almidón del plátano de seda obteniendo un rendimiento de extracción de 60,52%; la prueba determinada por espectrofotometría UV – Visible arrojó un porcentaje de pureza del 80%. Para determinar la dosis óptima de coagulante y floculante se realizó una prueba de jarras ; como coagulante se utilizó sulfato de aluminio, dando una dosis óptima de 50 ppm, después prepararon diversas soluciones con diferentes concentraciones de mezcla de almidón de plátano de seda – sulfato de aluminio; la mejor proporción de esta mezcla fue de 50 : 50 de almidón de plátano – sulfato de aluminio, el cual arrojó un porcentaje de remoción de turbiedad de 98,34%. Después realizaron un proceso similar con una mezcla de poliacrilamida – sulfato de aluminio, dando un porcentaje de remoción de turbiedad 98,80%.

Diaz et al. 2020 [8] estudiaron la capacidad de floculación de distintas especies de plantas tanto con almidones y mucílagos de *agave americana*, *salvia hispánica*, *aloe vera*, *Caesalpinia spinosa* y *Manihot esculenta*, para posteriormente realizar un análisis, comparación y una correlación entre ellos. Como resultados se obtuvieron 96,45%; 89,92%; 46,62%; 92,87%; 81,81%; 83,66%; de efectividad de lo mucilagos y 52,74%, 97,94% de efectividad del almidón de *Manihot esculenta* ante turbiedades diferentes respectivamente, llegando a la conclusión que estos floculantes son efectivos para el tratamiento de agua, logrando altas remociones de turbidez tanto los almidones como los mucílagos, siendo tan efectivos como el sulfato de aluminio y el cloruro férrico.

Posada et al. 2023 [9] elaboraron un floculante a base de almidones de maíz y papa, y evaluaron su efectividad en tratamientos de aguas residuales industriales. Los almidones

se modificaron por el método de acetilación con el objetivo de mejorar su solubilidad. La caracterización morfológica mediante microscopia electrónica de barrido (SEM) mostró que, debido a el proceso de acetilación, la superficie de los almidones acetilados presentó pequeñas erosiones. La caracterización de los grupos funcionales en los almidones mediante espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) mostró los cambios fisicoquímicos debidos a la acetilación, ya que se evidencio la sustitución de los grupos hidroxilo por los acetilos. Se identificó una pérdida de la calidad cristalina del almidón de maíz a través de la caracterización estructural utilizando difracción de rayos X (DRX). En el caso del almidón de papa, su característica estructura cristalina hexagonal se vio favorecida por el proceso de acetilación, ya que exhibió un patrón de difracción más definido. El análisis termogravimétrico por medio de (TGA) encontró tres eventos térmicos para el almidón de papa acetilado y cuatro para el almidón de maíz acetilado. El cuarto evento térmico en el almidón de papa acetilado se asoció con la presencia de ésteres del grupo añadido. La degradación térmica ocurrió a temperaturas más bajas ya que las curvas de pérdida de masa mostraron que la acetilación debilitó las cadenas poliméricas. La determinación de la eficiencia del floculante modificado a base de almidón se realizó utilizando una prueba de jarras usando diferentes dosis para encontrar la concentración óptima del coagulante/floculante. Las mediciones de turbidez, color, pH y conductividad eléctrica se realizaron antes y después del tratamiento del agua. Los resultados indicaron que tanto los almidones de maíz como los de papa tienen un buen desempeño como coagulantes/floculantes.

Por otro lado, Perales y Barrera. 2013 [10] Caracterizaron arcillas nativas y pilarizadas, mediante XRD con el fin de determinar la capacidad de hinchamiento, naturaleza de la arcilla, identificación de las fases minerales presentes y espaciamiento basal, el difractograma señala la presencia de tres fases cristalinas principales que son: montmorillonita, cuarzo y halita, y en pequeñas cantidades se encuentran caolinita, micas, interestratificados y feldespatos. En la fracción arena, el cuarzo domina con mínimo el 54% y pequeñas cantidades de feldespatos, granos alterados y fitolitos. La identificación del pico de espaciado basal ( $d_{001}$ ) que indica la capacidad de hinchamiento y del pico ( $d_{060}$ ) que señala la naturaleza de la arcilla que se tiene (di- o trioctaédrica).

Carriazo et al., 2004 [11] Estudiaron dos arcillas naturales procedentes del departamento de Córdoba (Colombia), las cuales fueron purificadas mediante separación mecánica y

tratamientos químicos. Uno de estos materiales se identificó como una arcilla esmectítica, su característica distintiva es la capacidad que posee para expandirse significativamente cuando se satura de agua y para contraerse cuando se seca., mientras que el otro mostró características vermiculítico-aluminosas, las cuales le confieren baja permeabilidad y resulta beneficiosa para la retención de partículas finas y sedimentos en los sistemas de filtración de agua. El mayor contenido de cationes sodio en la primera arcilla es un factor determinante que explica la mayor capacidad de expansión de este material. La presencia de pequeñas impurezas de cuarzo, illita, calcita, caolinita y posibles materiales alofánicos, reflejan los ambientes de origen y meteorización de los minerales primarios

Vidal. 2010 [12], evaluó la efectividad del filtro a base de arcilla y plata coloidal en la potabilización de agua, por medio de pruebas fisicoquímicas y microbiológicas que permitieran mejorar las condiciones iniciales del agua. Para el estudio se realizó la filtración de distintas muestras de agua tomadas del río Otún de la ciudad de Pereira, se usaron cinco filtros de arcilla mezclados con aserrín, uno de estos se usó como blanco (sin plata coloidal) y a los otros cuatro se les impregnaron distintas concentraciones de plata coloidal en suspensión. Finalmente se realizó una comparación entre el estado final e inicial del agua, para lo cual se determinó que no hubo gran diferencia en la remoción de turbiedad entre los diferentes filtros, además los porcentajes de reducción de la concentración de coliformes totales y fecales variaron entre un 99,56% y 100% para los filtros con plata coloidal, mientras que el filtro blanco tuvo una reducción promedio de 98,41%.

Arana. 2016 [13] realizó un estudio a escala sobre el uso de carbón activado granular en el proceso de filtración de agua clarificada del río Cauca, con el fin de analizar la eficiencia de remoción de turbiedad y materia orgánica. Se empleó carbón activado granular de origen bituminoso y arena en seis diferentes configuraciones (50%– 50%), (65%– 35%), (75%– 25%), (85%– 15%), (90% – 10%) y (100% CAG). Se consideró además una configuración con antracita y arena (70% – 30%) como medio filtrante principal para comparar el comportamiento de ambos materiales filtrantes. Se obtuvo como resultado que la configuración C5 con 90% de CAG y 10% Arena logró una mayor remoción de la turbiedad. En cuanto a la eficiencia de remoción de la materia orgánica, esta no fue significativamente alta, pero los mejores resultados fueron los encontrados para la configuración C4 con 85% de CAG y 15% Arena; por lo cual se observó que el uso de CAG como medio filtrante adsorbente presenta grandes ventajas comparado con los medios convencionales.

Carrión. 2021[14] determinó la eficiencia del filtro de arcilla, para la obtención de agua para consumo humano, empleando un filtro de arcilla revestido con plata coloidal. Se analizaron los siguientes parámetros: pH, turbiedad, color, conductividad eléctrica, sólidos totales, nitritos y metales pesado. Los resultados evidenciados muestran que, se mejoró la calidad del agua en los parámetros, color, solidos totales, turbiedad y metales como el aluminio y manganeso.

El análisis microbiano en el proceso de purificación de agua es el que genera más inconvenientes a la hora de proponer una metodología cuando lo que se pretende es usar materias primas naturales, dejando a un lado los agentes antibacterianos químicos, como lo son el cloro, y la plata coloidal; por tal motivo un material que se ha investigado en los últimos años por su capacidad para retener bacterias es el carbón activo proveniente de diversas fuentes naturales comúnmente de la cascarilla de arroz y de cascara de coco.

Infante. 2017 [15] determinó el efecto del carbón activo granular, en la mejora de la calidad del agua potable, para lo cual construyó filtros de carbón activo con capas de agregados tales como: 250 mm de grava de  $\frac{3}{4}$ " de diámetro, 100 mm de gravilla de malla N.º 04 y finalmente una capa de 300 m de carbón activo con una granulometría de 12 x 40; y evaluó cinco parámetros físicos, químicos y microbiológicos, como: turbidez y color verdadero, pH, coliformes totales y coliformes fecales, respectivamente. Se obtuvo como resultados que: la turbidez baja hasta un porcentaje de 2.54%; el pH a 25º C aumento hasta un porcentaje de 159.58% respecto a los valores iniciales de dichos parámetros; en cuanto a coliformes totales y fecales el filtro baja el valor de 100% a 0%; por lo cual se logró obtener un agua purificada apta para el consumo humano, ya que los resultados obtenidos se encuentran dentro de los rangos o valores máximos permisibles establecidos por el reglamento de la calidad del agua, 2011 de Perú.

Asmat Campos et al. 2020 [16] diseñaron y elaboraron filtros de arcilla agregando plata coloidal y nanopartículas de plata (NP Ag), desarrolladas mediante biosíntesis. Con el fin de analizar y estudiar el agua proveniente del afluente hídrico del río Moche, ubicado en la provincia de Trujillo, La Libertad – Perú, que cuenta con un elevado contenido de contaminación microbiológica. Los resultados sugieren el potencial efecto anti bacterial de los filtros con NP Ag para heterótrofos mesófilos viables (97.43%), coliformes totales (90%), coliformes fecales (76.08%) y E. Coli (90%).

Rivera et al. 2021 [17] evaluaron la efectividad de filtros de biocarbón/arcilla en la remoción de agentes contaminantes de tipo fisicoquímico y microbiológico en agua de dos pozos en el departamento de La Paz, El Salvador. De cada pozo cada 15 días durante 6 meses se tomaron 2 galones de agua para ser filtrada. Los resultados se compararon con los parámetros del Reglamento Técnico Salvadoreño para Agua Potable. El agua del primer pozo mostró una remoción de hierro de 82.29%, 22.41% de arsénico, 85.75% de turbidez, 91.68% de Coliformes totales, 100% de Escherichia Coli y 93.70% de Pseudomona aeruginosa; y el segundo pozo mostro una reducción del 100% de hierro, 14.98% de arsénico, 75.95% de turbidez, 76.98% de Coliformes totales, 100% de Escherichia Coli y 85.71% de Pseudomona aeruginosa. En conclusión, los filtros de biocarbón/arcilla son una alternativa para filtrar agua para consumo humano, disminuyen las concentraciones de contaminantes de tipo fisicoquímico y microbiológico.

Chávez. 2022 [18] obtuvo Carbón Activado a partir de endocarpio de coco y cascarilla de arroz y evaluó su efectividad para el tratamiento de aguas residuales, la elaboración del carbón se realizó mediante el método de activación química, con un agente activante con concentraciones del 85% de ácido fosfórico y ácido clorhídrico <9.9 %. Para determinar la eficiencia del carbón activado se emplearon 5 filtros en diferentes composiciones internas, los cuales demostraron óptimos resultados con valores máximos de 20%, 90%, 91%, 61%, 45% para pH, DBO, DQO, Conductividad eléctrica y Solidos suspendidos totales respectivamente. Sin embargo, en cuanto a las coliformes fecales, no se demostraron resultados de eficiencia en ninguno de los filtros. Siendo los filtros F2 (75% cascarilla de arroz/ 25% endocarpio de coco) y F4 (25% cascarilla de arroz/ 75% endocarpio de coco) los que mejores tratamientos produjeron.

## 1.2 Marco teórico

### 1.2.1 Proceso de potabilización del agua

El agua es el recurso de mayor importancia en el planeta, ya que permite el correcto funcionamiento de los procesos biológicos de los ecosistemas y, garantiza la supervivencia de todas las especies animales y vegetales.

El agua ayuda a eliminar las sustancias que resultan de los procesos bioquímicos producidos en el organismo; sin embargo, también puede transportar sustancias nocivas, ocasionando incluso daños permanentes en la salud de las personas.

Todos los cuerpos de agua poseen su propia capacidad de auto depuración cuando les son descargadas aguas residuales; sin embargo, esta capacidad es limitada, además puede tardar bastante, dependiendo del tipo de descargas se verá afectada la concentración de contaminantes y nutrientes, la disponibilidad de oxígeno disuelto, y la temperatura ambiental y del agua.

En los procesos de tratamiento de agua participan de manera simultánea factores: físicos, químicos y biológicos, por ejemplo, sobre la materia orgánica puede presentarse simultáneamente un rompimiento en sus enlaces por hidrólisis (acción del agua), por acción de microorganismos (biodegradación), y por sedimentación al presentarse adhesión entre partículas (factor físico). Estos procesos se presentan de manera natural en los cuerpos de agua y también se desarrollan, aunque de manera más controlada y eficiente en una planta de tratamiento, donde su velocidad de remoción de contaminantes es mayor [19].

Cuando se requiere la utilización de agua proveniente de distintas fuentes, se requiere que esta reciba un tratamiento previo, con el fin de ser adecuada para el consumo humano, por lo que, algunos de los sistemas de uso común para el tratamiento de agua son la cloración, la sedimentación, coagulación/floculación y decantación combinadas, floculación/cloraciones combinadas, la filtración/cloración combinadas la filtración, ebullición, y la desinfección solar.

El agua puede contener una variedad de impurezas, solubles e insolubles; entre estas últimas destacan las partículas coloidales, las sustancias húmicas y los microorganismos en general. Tales impurezas coloidales presentan una carga superficial negativa, que impide que las partículas se aproximen unas a otras y que las lleva a permanecer en un medio que favorece su estabilidad. Para que estas impurezas puedan ser removidas, es preciso alterar algunas características del agua, a través de los procesos de coagulación, floculación, decantación (o flotación) y filtración [20].

La potabilización del agua usando floculantes naturales reduce el uso de sales metálicas, y suele realizarse mediante un proceso de coagulación, floculación, decantación, reduciendo así los costos en plantas de tratamiento. El almidón y sus derivados han demostrado ser muy útiles para floculación de partículas minerales ultrafinas y metales de hierro [4].

Para lograr la limpieza del agua, es necesaria la utilización de agentes coagulantes, así como floculantes, que permiten eliminar un porcentaje significativo de las partículas en suspensión (típicamente entre 80 y 90%); este proceso es conocido como coagulación-floculación [2], y se realiza con ayuda de la prueba de jarras. La coagulación desestabiliza las cargas de las partículas, mediante un proceso de mezcla rápida con el fin de dispersar el coagulante, una vez que la carga se neutraliza, las partículas suspendidas son capaz de pegarse unas a otras formando micro flóculos. Durante la floculación se pueden agregar polímeros de alto peso molecular para ayudar no sólo a unir y fortalecer el flóculo, sino también para aumentar el peso y la velocidad de sedimentación, durante este proceso se aumenta el tamaño de las partículas de hasta obtener partículas suspendidas visibles. Estos micro flóculos se ponen en contacto entre sí mediante el proceso de mezcla lenta con el fin de formar flóculos más grandes y de mayor peso molecular los cuales pueden ser eliminados mediante diferentes medios físicos, donde el más utilizado es el método de decantación, donde con una posterior filtración ayuda a retener los flóculos, puede ayudar a eliminar o disminuir aún más ciertos contaminantes que estuvieran presentes en el agua. El uso del almidón modificado como floculante es una alternativa útil en la limpieza de aguas, ya que permite disminuir el uso de agentes químicos, reduciendo los costos en plantas de tratamiento, además de que se generan una menor cantidad de residuos que podrían ser contaminantes, y/o a largo plazo causar problemas de salud.

---

La calidad del agua potable está determinada por parámetros físicos, químicos y microbiológicos que cumplen con estándares de salud establecidos. La Resolución 2115 del 2007 define los requisitos de calidad del agua potable, como la concentración máxima permitida de contaminantes como bacterias, metales pesados, compuestos orgánicos y otros contaminantes químicos; además de los índices de riesgo de la calidad del agua en Colombia.

### **1.2.2 Prueba de jarras**

Para el diseño de un proceso de coagulación-floculación es necesario llevar a cabo una prueba de jarras; esta es una prueba que se realiza para determinar la dosis adecuada de coagulante y floculante para el tratamiento de aguas en una planta de tratamiento o en un laboratorio, además esta prueba permite hacer ajustes al pH, el tiempo de retención y la velocidad de agitación óptima que asegure una buena mezcla en el proceso de coagulación y un buen contacto entre las partículas. Permite la comparación y evaluación de la efectividad de una serie de coagulantes y floculantes, y por extensión oxidantes, alcalinizantes, etc. aplicados a un agua concreta (a potabilizar o a depurar) en unas condiciones experimentales dadas y perfectamente acotadas [21].

Los factores que pueden dificultar la determinación de las condiciones óptimas son: Cambios en la temperatura del agua durante la prueba, lo cual podría provocar corrientes de convección y afectar, así, la sedimentación normal de los flóculos. Intercambio gaseoso, es decir, formación de burbujas debido a agitación mecánica, cambios de temperatura o a reacciones químicas, lo que generaría la flotación de los flóculos. Período transcurrido entre la toma de muestras y el ensayo, pues tanto la actividad biológica desarrollada en el agua como otras reacciones fisicoquímicas podrían afectar la coagulación-floculación y posterior sedimentación del agua, así como la oxidación de las sustancias presentes en ella [22].

La turbidez se refiere a la cantidad de partículas sólidas suspendidas en el agua que hacen que esta sea opaca o turbia, siendo un indicador de la presencia de contaminantes. Una alta turbidez puede dificultar la desinfección del agua al enmascarar los microorganismos, lo que aumenta el riesgo de enfermedades transmitidas por el agua. Por tanto, la medición

de la turbidez en las pruebas de jarras ayuda a evaluar la calidad del agua y a identificar posibles problemas.

El pH en el agua es un indicativo de su alcalinidad y se basa en la concentración de iones hidrogeno ( $H^+$ ). El pH del agua puede afectar la capacidad de esta para disolver minerales y metales, lo que puede influir en su sabor, olor y capacidad de corrosión. Además, el pH puede influir en la efectividad de los tratamientos de desinfección y en la supervivencia de ciertos microorganismos.

### **1.2.3 Proceso de coagulación**

La coagulación es el proceso de desestabilización química de las partículas coloidales que se producen al neutralizar las fuerzas que las mantienen separadas. Las partículas coloidales en el agua por lo general presentan un diámetro entre 1 y 1.000 mili micrómetros, su comportamiento depende de su naturaleza y origen, siendo las principales responsables de la turbiedad. En términos generales, los denominados coloides presentan un tamaño intermedio entre las partículas en solución verdadera y las partículas en suspensión [20].

La función del coagulante es disociarse en el agua para liberar iones con carga positiva. Estos iones reaccionan con las partículas coloidales disueltas en el agua, las cuales por lo general se encuentran cargadas negativamente. Este proceso contribuye en la disminución de la carga negativa, facilitando de esa manera la formación de flóculos. La coagulación es resultado de dos fenómenos: El primero, se basa fundamentalmente en las reacciones del coagulante con el agua y la formación de especies hidrolizadas con carga positiva; depende de la concentración del coagulante y el pH final de la mezcla. El segundo, consiste en el transporte de especies hidrolizadas para que hagan contacto con las impurezas del agua.

Los coagulantes más comunes son aquellos a base de sales trivalentes y aluminio como sulfato de aluminio, sulfato de hierro y cloruro de hierro. Para la aplicación de este proceso es importante tener en cuentas las características fisicoquímicas del agua, dosis y concentración del coagulante. Este proceso se lleva a cabo a agitación rápida durante un corto tiempo, algo que se denomina mezcla rápida. Las partículas se desestabilizan y chocan entre sí, aglomerándose, formando micro flóculos; estos después pueden ser removidas con mayor eficiencia tras un proceso de floculación, mediante procesos físicos.

La remoción de las partículas coloidales está relacionada estrictamente con una adecuada coagulación, pues de ella depende la eficiencia de las siguientes etapas: floculación, decantación y filtración [20].

Algunos autores han planteado que posiblemente las sales de aluminio se encuentren asociadas con la enfermedad de Alzheimer y otras enfermedades neurológicas. Por su parte las consecuencias adversas al medio ambiente por el uso de sales inorgánicas en el tratamiento del agua pueden variar desde la generación de altos volúmenes de desechos inorgánicos potencialmente contaminantes para el medio ambiente, los cuales requieren la eliminación apropiada [23], cambios en el pH del agua e ineficacia de estos a baja temperatura [24].

#### 1.2.4 Proceso de floculación y aplicación de floculantes naturales

La floculación consiste en la unión de las partículas que ha sido desestabilizadas en la coagulación mediante agitación lenta para así promover la formación de flóculos o unión de las partículas en suspensión, esto se realiza con el fin de formar partículas más grandes con peso específico superior al del agua y así facilitar la decantación.

**Figura 1-1:** Proceso de coagulación- floculación, decantación.



Fuente: Morales (2010). [25]

El floculante introducido da lugar a la formación del flóculo, pero es necesario aumentar su volumen su peso y sobre todo su cohesión. La sílice activada fue el primer floculante que se empleó, y sigue siendo, en la actualidad, el que mejores resultados puede dar. También existen floculantes minerales (algunas arcillas, carbonato cálcico precipitado, carbón activo en polvo, arena fina) y orgánicos como el almidón [25] y polielectrolitos.

El empleo de los floculantes permite tratar mayores caudales de agua, además de mejorar la floculación cuando ésta es difícil por cambios de calidad, bajas temperaturas, etc.

## **Floculantes naturales**

Los floculantes orgánicos son polímeros solubles en agua que están basados en unidades repetidas de varios monómeros; se consideran una fuente alternativa con un gran potencial, debido a que son biodegradables y no generan daños al medio ambiente en comparación con coagulantes inorgánicos y polímeros sintéticos. Los floculantes naturales provienen de fuentes animales o vegetales con presencia de agentes floculantes activos como carbohidratos, taninos y proteínas [26], y actúan de manera similar a los floculantes sintéticos. Algunos de estos floculantes poseen además propiedades antimicrobianas, por lo que reducen o eliminan el contenido de microorganismos patógenos susceptibles de producir enfermedades [27].

Las fuentes más comunes de almidón que se encuentran reportadas en la literatura para su uso como floculante se han enfocado en almidones provenientes de yuca, plátano, maíz e incluso papa; sin embargo, no se encuentran reportes relacionados con la obtención y uso del almidón proveniente del bore, además de que tampoco se encuentran reportes en los cuales este almidón haya sido modificado químicamente. Es importante determinar cuáles son y cómo cambian las propiedades fisicoquímicas de este almidón tras ser acetilado, para determinar posibles aplicaciones en el tratamiento de aguas y de esta forma aprovechar el fácil acceso a este recurso tan útil, abundante y poco aprovechado. De acuerdo con lo reportado en diferentes investigaciones a lo largo de los años, las propiedades del almidón también pueden depender de la fuente botánica, de las características medioambientales en las cuales se encuentra el cultivo, e incluso del estado fisiológico de la planta al momento de ser cosechado, por esta razón estudiar este material siempre es un campo abierto para la investigación.

---

### 1.2.5 Proceso de filtración en tratamiento de aguas

La filtración es un proceso en el cual las partículas sólidas que se encuentran en un fluido líquido o también gaseoso se separan mediante un medio filtrante, que permite el paso del fluido, pero retiene las partículas sólidas. Unas veces interesa recoger el fluido; otras, las partículas sólidas y, en algunos casos, ambas cosas [28]. El medio filtrante puede ser arena, tierra de diatomeas, tejido filtrante, papel poroso, etc. Los filtros pueden extraer los sólidos en suspensión, los patógenos y ciertos productos químicos, sabores y olores [12].

La filtración usualmente es considerada como el resultado de dos mecanismos distintos pero complementarios: transporte y adherencia. Inicialmente, las partículas por remover son transportadas de la suspensión a la superficie de los granos del medio filtrante. Ellas permanecen adheridas a los granos, siempre que resistan la acción de las fuerzas de cizallamiento debidas a las condiciones hidrodinámicas del escurrimiento [29].

Este método se aplica cuando la cantidad de materias que deben retenerse es grande y la dimensión de las partículas contenidas en el agua menores a 0.02 mm, asumiendo una fuente de buena calidad y sin contaminación [12]. Usualmente, la filtración es la etapa final en un proceso de clarificación o tratamiento de agua; y es la responsable de retener los últimos contaminantes presentes en el agua con el fin de que esta sea de calidad para que cumpla con los estándares de potabilidad.

### 1.2.6 Arcilla

Las arcillas son materiales naturales de naturaleza inorgánica, granulosos, formadas por pequeñas partículas repartidas en la superficie de la corteza terrestre y que, en ocasiones al ser mezclados con agua pueden formar masas plásticas a partir de las cuales es factible fabricar productos cerámicos. Están constituidas por partículas cristalinas extremadamente pequeñas y compuesta principalmente por silicio, aluminio, agua y frecuentemente hierro y materiales alcalinos y alcalinotérreos en pocas cantidades, así como materia orgánica y otros compuestos amorfos [30]. Se puede decir que los materiales arcillosos, naturales son asociaciones de minerales de muy diverso tamaño con predominio de fracciones finas [31]. La teoría geológica explica que la formación de las arcillas se da por la descomposición de las rocas ígneas primarias o rocas básicas, como los granitos, feldespatos o pegmatitas, los cuales son alterados por los agentes atmosféricos a través del tiempo, produciéndose

las diferentes clases de arcilla según el grado de intemperización hasta alcanzar tamaños menores que dos micras (0.002 mm) [32].

La estructura cristalina de las arcillas está formada principalmente por dos grupos: grupos de sílice tetraédricos y grupos de alúmina octaédricos. Los grupos del mismo tipo están unidos entre sí hexagonalmente formando capas de tetraedros y octaedros. Si un mineral de arcilla presenta un empaquetamiento de una capa tetraédrica y una octaédrica se denomina de tipo 1:1 o bilaminares; de una octaédrica entre dos tetraédricas, de tipo 2:1 o trilaminares; y si son dos de cada uno, tipo 2:2 [30]. La estructura y composición de las hojas octaédricas y tetraédricas de los diferentes minerales arcillosos explica la diferencia de sus propiedades físicas y químicas. De forma general, las sustituciones isomórficas en las hojas octaédricas y tetraédricas de los minerales arcillosos dan lugar a la aparición de un desbalance de carga en las láminas de su estructura, así como la presencia de cationes débilmente ligados en el espacio interlaminar. Como consecuencia de estos factores, las arcillas presentan un valor elevado del área superficial y una gran cantidad de superficie activa con enlaces no saturados. Por ello, pueden interactuar con diversas sustancias, en especial compuestos polares, por lo que tienen comportamiento plástico en mezclas arcilla agua con elevada relación sólido/líquido y son capaces en algunos casos de hincharse, con el desarrollo de propiedades reológicas en suspensiones acuosas [33].

Algunas de las propiedades características de la arcilla son la plasticidad, aglutinación, contracción, vitrificación, porosidad y adsorción de agua. Debido a su capacidad de adsorción y absorción, la arcilla es útil en la limpieza de aguas debido a que esta puede retener diversas sustancias y contaminantes presentes en el agua. Esta característica la convierte en un material útil en procesos de purificación y tratamiento de aguas. Cuando se dice que la arcilla tiene capacidad de adsorción, significa que puede retener en su superficie moléculas, iones o partículas de otras sustancias. La adsorción es más específica que la absorción, ya que las sustancias se adhieren a la superficie de la arcilla sin penetrar en su estructura interna. En el contexto del tratamiento de aguas, la arcilla puede ayudar a eliminar impurezas, contaminantes orgánicos e inorgánicos, metales pesados y algunos patógenos de mayor tamaño que se encuentren presentes en el agua. Estos contaminantes son atraídos y retenidos por las partículas de arcilla debido a su estructura porosa.

---

El proceso de filtración mediante filtros construidos a base de arcilla y carbón activado ha sido objeto de investigación en varias áreas, incluyendo el tratamiento de agua, la purificación de aire y aplicaciones industriales. Estos filtros se han utilizado y estudiado debido a sus propiedades naturales de adsorción, retención de partículas y capacidad de intercambio iónico. Es importante establecer si estos filtros son útiles en los procesos de potabilización de aguas, además de establecer la capacidad de retención de compuestos orgánicos, virus y bacterias. La arcilla y el carbón son materiales abundantes, de bajo costo, y fácil obtención, lo que hace que los filtros a base de estos materiales sean una opción asequible para el tratamiento de aguas, especialmente en áreas donde el acceso a tecnologías más complejas puede ser limitado.

### **1.2.7 Carbón activado**

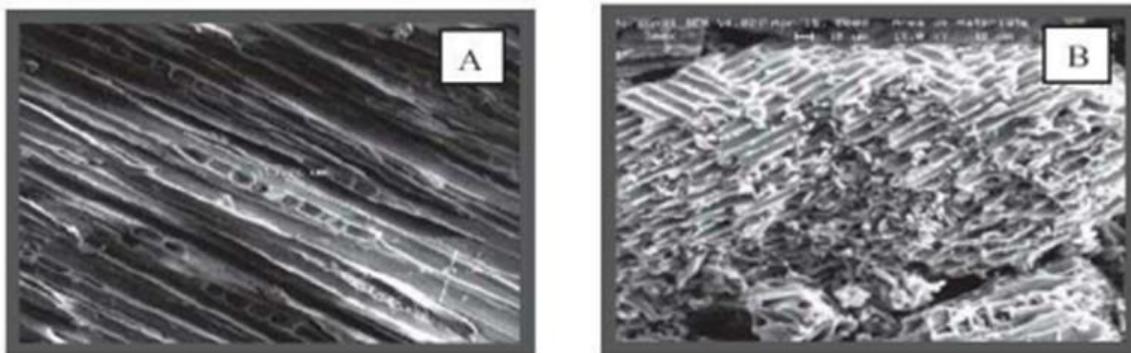
El término de carbón activado hace referencia a aquel producto obtenido a partir de carbón amorfo que siendo sometido a un proceso físico o químico aumenta su porosidad, cristalinidad y su área superficial interna, la cual depende de la materia prima utilizada y del proceso de activación. Un carbón activado posee una estructura y disposición atómica muy diferente a la de un carbón normal, ya que su estructura y propiedades se asemejan a la del grafito. El carbón activado es extremadamente poroso y puede llegar a desarrollar áreas superficiales del orden de 500 a 1500 metros cuadrados o más, por gramo de carbón.

El carbón activado está dentro de los adsorbentes comerciales más comúnmente utilizado en la potabilización de aguas y en el tratamiento de residuos líquidos, ya que debido a su superficie interna es un excelente adsorbente para eliminar impurezas orgánicas. Es reconocido por remover una numerosa cantidad de contaminantes orgánicos, que pueden causar cambios en el sabor, olor y color del agua. El carbón activado se puede clasificar según el tamaño del poro en granular y polvo.

La gran capacidad de remoción de sustancias que contienen carbono se debe a su alta porosidad y superficie interna, que juegan un papel fundamental. Los macroporos se encuentran primariamente en el material antes de su activación. Los microporos y mesoporos que se forman en el proceso de activación y son los que mejoran las propiedades de absorción. En síntesis, los microporos le otorgan elevada superficie y

capacidad de retención. Los mesoporos y macroporos son indispensables para retener moléculas de tamaño grande, como los colorantes o coloides, además de favorecer el acceso y la rápida propagación de las moléculas a la superficie interna del sólido [34].

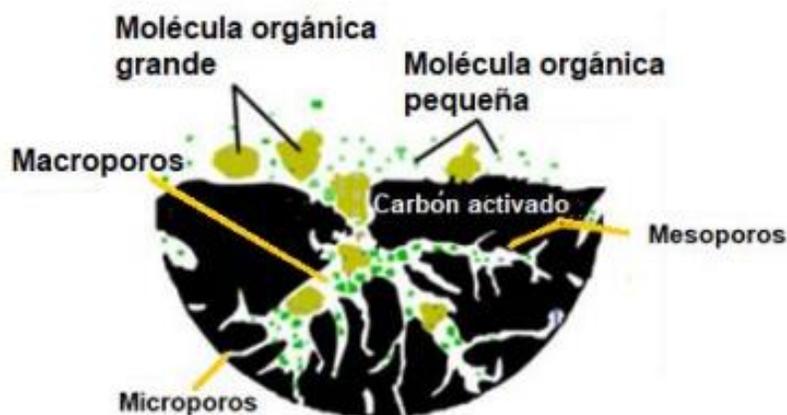
**Figura 1-2:** Micrografías de carbón: Materia prima (A), carbón activado (B).



Fuente: Mohan and Pittman (2007). [35]

La capacidad del carbón activado para retener una sustancia específica depende de su área superficial y la proporción de poros que posean tamaño sea adecuada, esto es, de una a cinco veces el diámetro de la molécula de la sustancia [34]

**Figura 1-3:** Representación del proceso de transporte y adsorción de contaminantes en el carbón activado.



Fuente: Román (2021).

Por su parte, la capacidad del carbón activado en la adsorción de metales es un proceso más complejo que la retención de compuestos orgánicos, ya que, la carga de los metales

afecta la cinética de adsorción en la solución y al igual que para todo adsorbente, la capacidad máxima de adsorción de un carbón activado depende de las propiedades químicas del adsorbato, la temperatura, el pH y la presencia de otros iones en la solución [35].

Los materiales más estudiados como precursores de carbones activados son los de tipo lignocelulósico, utilizados tanto para fase líquida como gaseosa. Dentro de estos precursores, los más comunes son los residuos agroindustriales, tales como maderas, y residuos de la agricultura [36].

### 1.2.8 Filtro de arcilla

Es un dispositivo casero tratamiento de agua, de muy bajo costo, que se utiliza para limpiar agua contaminada. Este elemento filtrante puede ser fabricado por ceramistas, con materiales comunes, sin tecnologías de alto nivel. Por su estructura permite eliminar la turbidez y por su microporo evita el pasen ciertos contaminantes orgánicos [28].

**Figura 1-4:** Filtro de arcilla



La adsorción es una de las propiedades de la arcilla, por lo que los filtros fabricados con este material los hace útil en descontaminar aguas mediante sus poros microscópicos que dejan pasar el agua reteniendo todas las partículas en suspensión. Los iones de metales, metaloides y químicos tóxicos también son retenidos por adsorción. Existen varios tipos de filtros en la categoría de arenas, y de materiales arcillosos, por lo general el primero se

fabrica de granos bastantes gruesos para filtrar el agua contaminada con materia orgánica o con grandes cantidades de minerales como hierro y manganeso [37].

### 1.2.9 Bore

El Bore (*Alocasia Macrorrhiza*) es una planta originaria de la India y Sri Lanka (Brown. 1988) [38], que se desarrolla en gran variedad de suelos. En Colombia, las plantas del género *Alocasia* se encuentran desde las tierras costeras los valles interandinos y Macizo Colombiano a unos mil setecientos (1700) metros sobre el nivel del mar (msnm). Alcanza un máximo desarrollo en escenarios aledaños a ríos y quebradas con sombra, resultando útil para la conservación de la humedad relativa de estas áreas (Gómez. 2001) [38]. El bore es una planta que posee características especiales para ser utilizada en alimentación de aves y otras especies menores, porque durante su ciclo de vida (3 años) puede producir hojas que contienen hasta un 25% de proteína y se ha reportado que contienen 10% de grasa y altas concentraciones de vitamina A, C y minerales. (Girata et al. 2013). Durante este tiempo desarrolla su tallo aéreo, que puede alcanzar hasta 5 m y 25 kg de peso, acumulando carbohidratos en forma de almidón. (Ayala et al. 2012) [39].

Según la observación biológica y teórica la clasificación biológica del bore se informa en la Tabla 1-2.

**Tabla 1-2:** Clasificación biológica del Bore (*Alocasia Macrorrhiza*).

<b>Reino</b>	Vegetal
<b>Tipo</b>	Fanerógamas
<b>Subtipo</b>	Angiospermas
<b>Clase</b>	Monocotiledóneas
<b>Orden</b>	Espadiciflorales
<b>Familia</b>	Aráceas
<b>Subfamilia</b>	Colocasioidea
<b>Genero</b>	Alocasia
<b>Especie</b>	Macrorrhiza
<b>Fitonimia</b>	Bore

Fuente: Basto. (1995). [40]

**Morfología:** El bore, presenta un sistema de raíces fasciculado, sin una penetración muy profunda en la tierra, pero puede extenderse hasta aproximadamente 1,5m a partir del tallo. El cual, es aéreo, y corto (en algunas plantas el tamaño de las hojas es mayor al del tallo), este presenta una gran cantidad de yemas las cuales pueden dar origen a nuevas

plantas, el interior del tallo es blando, presenta una coloración amarilla, y puede ser consumido por animales, e incluso humanos.

Las hojas son peltadas, presentan una coloración verde variable que cambia desde un tono claro para las hojas más jóvenes a uno más oscuro en las hojas más antiguas, aproximadamente un 64,3% del peso total de la planta lo constituyen las hojas.

El bore dentro de la familia de las Aráceas presenta una inflorescencia en espádice (forma de dedo) con una parte envolvente llamativa de color rosado (espata). Las flores son desnudas, y unisexuales y exhalan un olor agradable y penetrante; con estambres sinadros o unidos entre sí [41].

**Figura 1-5:** Fotografía de las plantas del bore, Riosucio Caldas, comunidad de Sipirra.



**Figura 1-6:** Fotografía del corte del tallo del bore, Riosucio Caldas, comunidad de Sipirra.



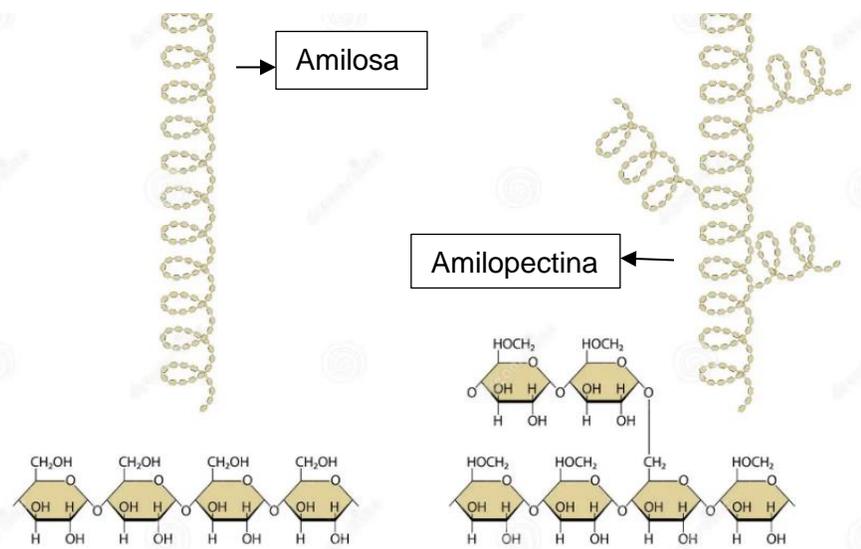
### 1.2.10 Almidón

El almidón es el hidrato de carbono más abundante en la tierra, el cual da el mayor aporte de energía a los humanos [42]. Se presenta naturalmente en forma de gránulos en los cloroplastos de hojas verdes y amiloplastos de semillas, legumbres y tubérculos. Generalmente se encuentra conformado por dos macromoléculas que confieren ciertas características fisicoquímicas al almidón; la amilosa que ocupa el 20% de su composición y es esencialmente un polímero lineal, y la amilopectina que ocupa el 80% de la

composición total del almidón, la cual es una molécula ramificada mucho más grande. Cabe resaltar que esta proporción depende del tipo de fuente botánica.

Su estructura molecular se basa en la unión de estas macromoléculas, unidas entre si mediante enlaces  $\alpha$ -D-(1-4) y/o  $\alpha$ -D-(1-6); la amilosa, con grado de polimerización de 100 a 1000 unidades de glucosa y la amilopectina, con grado de polimerización de aproximadamente 40.000 unidades de glucosa (figura 1-3).

**Figura 1-7:** Organización de las cadenas de amilosa y amilopectina.

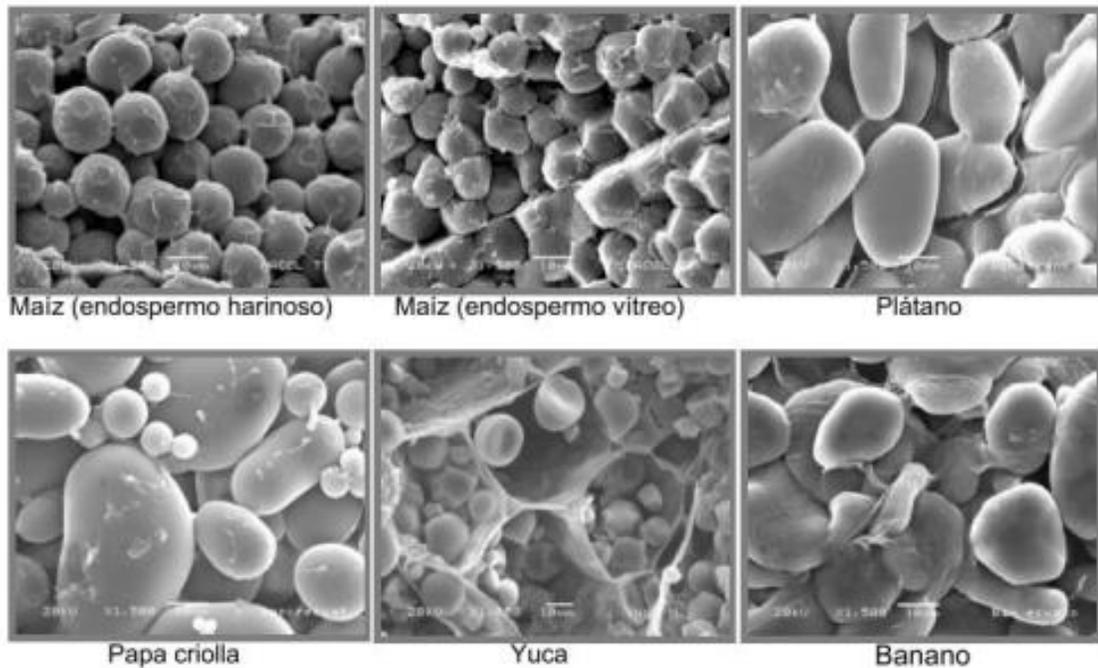


La digestión del almidón, tanto de la amilosa como de la amilopectina, está principalmente mediada por amilasas, dextrinasas y disacaridasas que actúan hidrolizando el almidón a monómeros de glucosa que se absorben directamente a través de la mucosa intestinal. La digestibilidad del almidón depende de la estructura del gránulo nativo, que tiene una disposición semicristalina compleja y altamente ordenada. Uno de los principales factores que afectan la digestibilidad del almidón y su respuesta fisiológica se atribuye al tamaño del gránulo, estructura molecular y a la relación amilosa/amilopectina, además del origen botánico que determina la organización y la morfología cristalina [43].

La morfología de los gránulos de almidón depende de la fuente botánica del cual es extraído. Su forma puede ser ovalada, lenticular, poliédrica, esférica, entre otras formas, y sus tamaños varían entre 2 y 100  $\mu\text{m}$ , esta característica y su distribución influyen en las

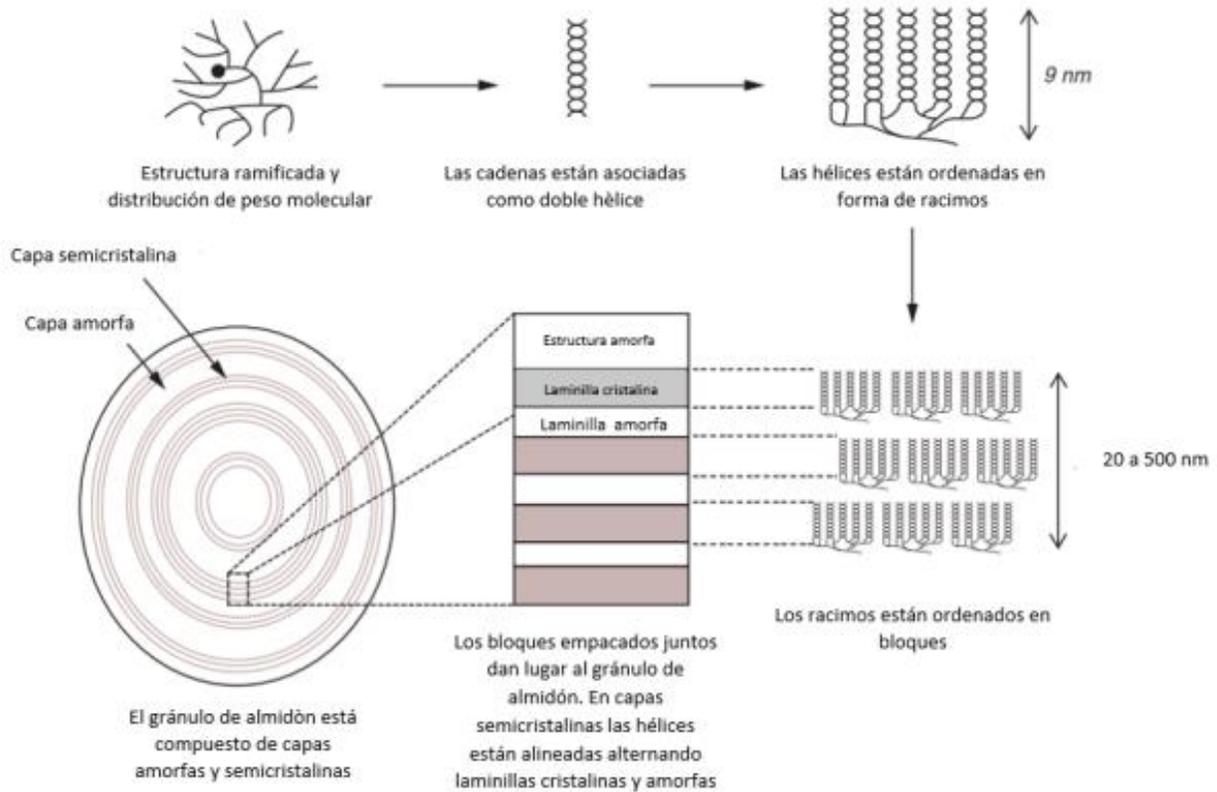
propiedades funcionales de cada almidón. La figura 1-4 muestra algunas micrografías obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) de almidones de diferentes fuentes botánicas; en estas se pueden apreciar las diferentes formas que los gránulos de almidón pueden presentar según su origen. Además, mediante algunas técnicas de microscopía se ha logrado determinar que la organización interna de los gránulos, es decir la forma en la cual se encuentran distribuidos la amilosa y la amilopectina, es en anillos concéntricos o anillos de crecimiento (figura 1-5), formados por bloques alternantes de lamelas amorfas y cristalinas de baja y alta densidad. Además, se encuentran densamente empaquetadas por medio de enlaces de hidrógeno intra e intermoleculares, formando un estado policristalino que hace que los gránulos sean insolubles en agua fría [44].

**Figura 1-8:** imágenes SEM de diferentes fuentes de almidones.



Fuente: Pineda Gómez. [45]

**Figura 1-9:** Representación esquemática de la estructura del gránulo de almidón.



Fuente: Vega. (2020). [46]

Las propiedades térmicas de los almidones dependen directamente de la relación amilosa/amilopectina [47]. Entre estas propiedades las que se destacan son: Gelatinización, retrogradación; solubilidad, hinchamiento, absorción de agua, sinéresis y comportamiento reológico de sus pastas y geles [48].

El almidón, además de ser importante nutricionalmente, se utiliza en una serie de aplicaciones, como ingrediente funcional debido a su fino tamaño de partícula, apariencia blanca y sabor suave que contribuyen fuertemente a las propiedades tecnológicas de muchos alimentos [43]. En la industria es ampliamente utilizado como aglutinante, adhesivo, gelificador, espesante, formador de películas. El almidón de maíz trigo y yuca son los de mayor comercialización debido a la abundancia de su fuente botánica. La diversidad de propiedades funcionales de los almidones en la industria es casi ilimitada, por lo que posee una gran importancia económica.

El almidón se comercializa tanto en su forma nativa como modificado. Se extrae mediante métodos físicos y se comercializa como un polvo. Aunque el polímero nativo ha recibido considerable atención debido a que es un material que regula y estabiliza la textura de productos por sus propiedades; en su estado nativo presenta limitaciones que reducen su potencial uso ante las extremas condiciones de proceso (temperatura, pH y presión) [44]. Estas limitaciones se deben a su baja estabilidad térmica, alta tendencia a la retrogradación y sinéresis, hidrofobicidad que limita sus aplicaciones en cuanto a la absorción de agua.

### **1.2.11 Modificación química del almidón por acetilación**

Pero las limitaciones funcionales del almidón nativo pueden ser superadas modificando la estructura nativa del almidón. Entre la enorme variedad de aplicaciones que tiene el almidón, algunas exigen que el este polímero sea capaz de tolerar una amplia gama de técnicas de procesamiento, almacenamiento y condiciones finales de preparación [49].

La modificación radica en mejorar una o más propiedades fisicoquímicas específicas, como por ejemplo la resistencia a la degradación, solubilidad; de forma que se facilite su aplicación en el proceso de fabricación de un producto o su correcta funcionalidad en ciertos procesos.

Para aplicaciones en las cuales la solubilidad del almidón en agua sea importante, este debe ser modificado debido a la incapacidad que posee para reaccionar con el agua fría, lo que hace que sus usos en su forma nativa sean muy reducidos.

Debido a que la finalidad de la modificación es incrementar la funcionalidad, esta se realiza por diversos métodos, químicos o enzimáticos, entre los que se destacan: método de hidroxipropilación y pregelatinización (Vargas et al. 2016), modificación por acetilación, modificación química por oxidación (Zamudio-Flores et al. 2015), modificación hidrotérmica (Pérez et al. 2017), reacción de glucosilación (Valero and Díaz 2016), modificación por hidrólisis enzimática ( $\alpha$ -amilasa y amiloglucosidasa) (Leyva et al. 2019) [42].

---

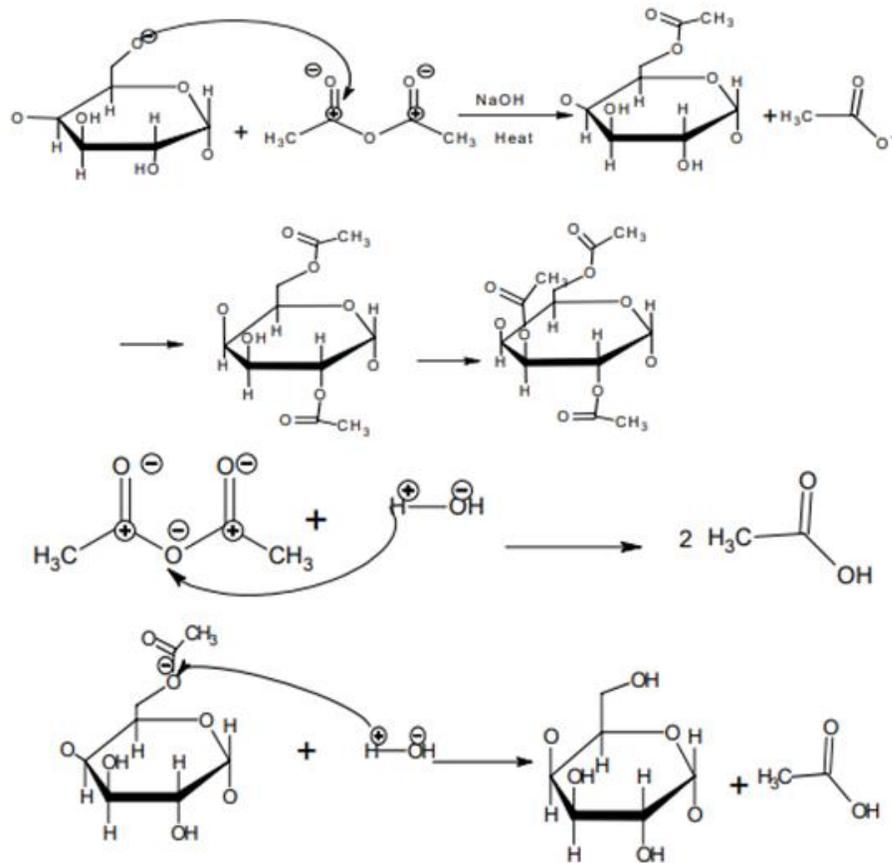
## Acetilación del almidón

Las múltiples técnicas y procesos de modificación química que se pueden al almidón permiten impartirle propiedades útiles en aplicaciones específicas como en la industria de papel, la elaboración de textiles, la formulación de alimentos y en la elaboración de películas o empaques biodegradables [50]. La acetilación es un tipo de modificación química, la cual consiste en la esterificación de las moléculas de almidón con anhídrido acético, donde los grupos hidroxilo (OH) son sustituidos por grupos acetilos ( $\text{CH}_3\text{-C=O}$ ). Los almidones acetilados presentan mejores propiedades sobre los almidones nativos y se han utilizado para impartir estabilidad y resistencia a la retrogradación [50].

La reacción de acetilación se mide por el grado de sustitución, el cual se mide en diferentes grados de acuerdo con su posible aplicación, esta reacción depende de: la fuente de origen del almidón, la concentración del agente modificante, el tiempo de concurrencia de la reacción, la disposición amilosa y amilopectina, pH. [51]

Las reacciones que ocurren durante la acetilación son ilustradas en la figura 1-6; el almidón es acetilado con anhídrido acético utilizando una base como catalizador. Esta reacción es un ejemplo de una sustitución nucleofílica en un carbono insaturado del anhídrido acético. Además, los tres diferentes grupos hidroxilo tienen diferente reactividad. El primer -OH en el carbono 6 es más reactivo y la acetilación es llevada a cabo más fácilmente que en los carbonos 2 y 3. De los grupos -OH secundarios, el grupo -OH en el C2 es más reactivo que el del C3 [52].

**Figura 1-10:** Reacción química por acetilación del almidón.



Fuente: Han et al. (2012). [49]

La incorporación de grupos acetilos interrumpe la linealidad de la amilosa o segmentos de amilopectina, lo que provoca la re-asociación de las cadenas de almidón hacia una estructura ordenada luego de la gelatinización y enfriado del producto (retrogradación), al interrumpir la linealidad de la amilosa o segmentos de amilopectina; este tipo de esterificación proporciona a las moléculas de almidón termo plasticidad, hidrofobicidad y compatibilidad con otros aditivos [53].

---

### 1.3 Área problemática y preguntas de investigación

La meta mundial de los ODM para el acceso a agua potable se superó en 2015, con el 91% de la población mundial teniendo acceso a fuentes de agua mejoradas. Sin embargo, aún hay 663 millones de personas sin acceso a agua potable, ubicándose la mayoría de estas en zonas rurales.

En el caso de Colombia, a pesar de ser el sexto país con más recursos hídricos, enfrenta problemas con el abastecimiento de agua segura debido al aumento anual del consumo, la deforestación y el cambio climático, afectando la disponibilidad en muchas áreas del país. En 2014 se emitió el CONPES 3810 y en 2015 la Ley 1753, buscando mejorar el suministro de agua potable y saneamiento en áreas rurales y de difícil acceso. Sin embargo, el estudio nacional del agua de 2022 reveló que el 20% de los municipios del país presentan una cobertura de servicio público de acueducto superior al 90% (221 municipios del país), mientras que el 6,8% de los municipios del país presentaron coberturas inferiores al 15% (75 municipios). Además, se reportó que solo el 37% de las zonas rurales del país cuentan con el servicio de acueducto aumentando en solo dos puntos porcentuales respecto al reporte presentado en el año 2018.

Según el censo de atención primaria social de Riosucio Caldas, para el año 2014 el 73,5% de la población utilizaba el acueducto veredal para consumo humano y uso doméstico; el 15,0% el agua proveniente del acueducto urbano; el 7,9% el individual; del 2,6% no se obtuvieron datos; el 0,8% utiliza el agua proveniente de pozos; el 0,1% del río o caño; y el 0,1% proveniente de la lluvia. Respecto al acceso a fuentes de agua mejoradas, se reporta que el 43,7% de la población realiza procesos de desinfección al agua, como la desinfección con cloro o la eliminación de patógenos mediante hervido; el 36,1% utiliza el agua directamente de las fuentes de abastecimiento; el 17,5% utiliza el agua proveniente del acueducto; y del 2,7% no se tiene información.

Para el caso concreto de las comunidades y veredas que pertenecen a los resguardos indígenas del municipio de Riosucio, estas surten sus hogares y actividades económicas de los diversos nacimientos, ríos y cuencas que se encuentran en estos sitios, ya que no se cuenta con el acceso al acueducto del municipio, debido a la lejanía con los sistemas de tratamiento municipales, además muchas de estas comunidades prefieren los

acueductos veredales, ya que el costo del servicio de agua que se les presta es muy económico, a comparación del servicio público de agua que se paga en el área urbana del municipio. El consumo de estas aguas de nacimientos genera riesgos para la salud debido a que estas aguas están expuestas a contaminación por altas concentraciones de bacterias, virus, patógenos y elementos no biológicos, como minerales y sustancias químicas provenientes de actividades agrícolas, lo que lo hace inviable para el consumo humano.

Con base en el anterior contexto se plantean las siguientes preguntas de investigación:

¿Qué modificaciones se pueden hacer al almidón de bore para que este sea eficiente en el proceso de coagulación floculación en la limpieza de aguas?

¿Cuales características fisicoquímicas de los filtros a base de arcilla y carbón activado deben garantizarse para que sean buenos purificadores de agua?

## 1.4 Justificación

La investigación realizada tuvo un enfoque social, ya que esta busca mejorar la calidad de vida de los habitantes de la vereda Sipirra del municipio de Riosucio Caldas. La motivación para hacer esta investigación es de carácter práctico, ya que busca dar respuesta a la problemática que presentan los habitantes de la comunidad mencionada y brindarles oportunidades prácticas, útiles y sobre todo sencillas para acceder al agua potable.

Durante los últimos años se han incrementado diversos métodos para la purificación y almacenamiento de agua en zonas rurales del municipio, debido a que en algunas épocas del año el líquido escasea debido al aumento de la temperatura, lo que hace que los nacimientos se sequen parcialmente y por ende la población sufre racionamientos diarios durante ciertas horas del día. Con el fin de mantener el suministro básico a los hogares rurales; un método común para la eliminación de contaminantes es hervir el agua, pero este método no es eficiente en la eliminación de contaminantes químicos, ya que existe el riesgo de una re-contaminación durante el enfriamiento, además esta debe ser almacenada adecuadamente.

Con esta investigación se estudió más a fondo las propiedades de floculación del almidón de bore, fuente que se cultiva en el territorio del resguardo indígena de Cañamomo y

Lomapieta con el fin de servir como alimento de animales domésticos como gallinas, cerdos, pollos, entre otros. Se considera que esta planta es una gran fuente nutricional por su alto contenido de proteínas que se encuentran en las hojas, y su elevado contenido de almidón en el pseudotallo, además es sembrado en cuencas de ríos, quebradas y nacimientos por su capacidad para retener la humedad y su utilidad para dar sombra. La utilización de esta fuente de almidón no generó un impacto en la seguridad alimentaria de la población, por el contrario, se dio utilidad a un recurso natural que no es valorado lo suficiente y su uso posiblemente generará un cambio en el estilo de vida y la salud de la comunidad.

Se escogió la arcilla como filtrante, ya que cultural y tradicionalmente en el territorio del Resguardo Indígena en mención precisamente en la comunidad de portachuelo se ha trabajado la alfarería como sustento económico de muchas familias, además de tener un fin ornamental, también se fabrican ollas o vasijas como filtros de agua caseros que aunque no garantizan una limpieza completa del agua, le generan un poco más de confianza a los usuarios, porque este elimina olores y sabores en el agua.

Se usó el carbón activado porque se encontraron varias investigaciones sobre las propiedades antibacterianas de este material. Con este filtrante lo que se hizo fue formar una barrera que sirvió como agente retenedor de patógenos, Coliformes totales y bacterias como *Escherichia Coli*.

Para evaluar el impacto del suministro de agua potable a la población, cabe señalar lo indicado en la agenda 21 de las Naciones Unidas: "...El suministro de agua potable y el saneamiento ambiental son vitales para la protección del medio ambiente, el mejoramiento de la salud y la mitigación de la pobreza. El agua potable también es fundamental para muchas actividades tradicionales y culturales. Se estima que el 80% de todas las enfermedades y más de un tercio de los fallecimientos en los países en desarrollo se deben al consumo de agua contaminada y que, en promedio, hasta la décima parte del tiempo productivo de cada persona se pierde a causa de enfermedades relacionadas con el agua..." (ONU, 1992) [54].

La Organización Mundial de la Salud (OMS) establece las directrices para la calidad del agua potable y es el punto de referencia para las legislaciones nacionales. En Colombia la

Resolución 2115 de 2007 establece las características, instrumentos básicos y frecuencias para la vigilancia de la calidad del agua para consumo humano.

## **1.5 Objetivos**

### **1.5.1 Objetivo general**

Potabilizar agua de nacimiento mediante la elaboración de un filtro a base de arcilla y carbón activado, previo tratamiento de floculación con almidón de bore, con el fin de mejorar la calidad de vida de los habitantes de la vereda Sipirra del municipio de Riosucio Caldas.

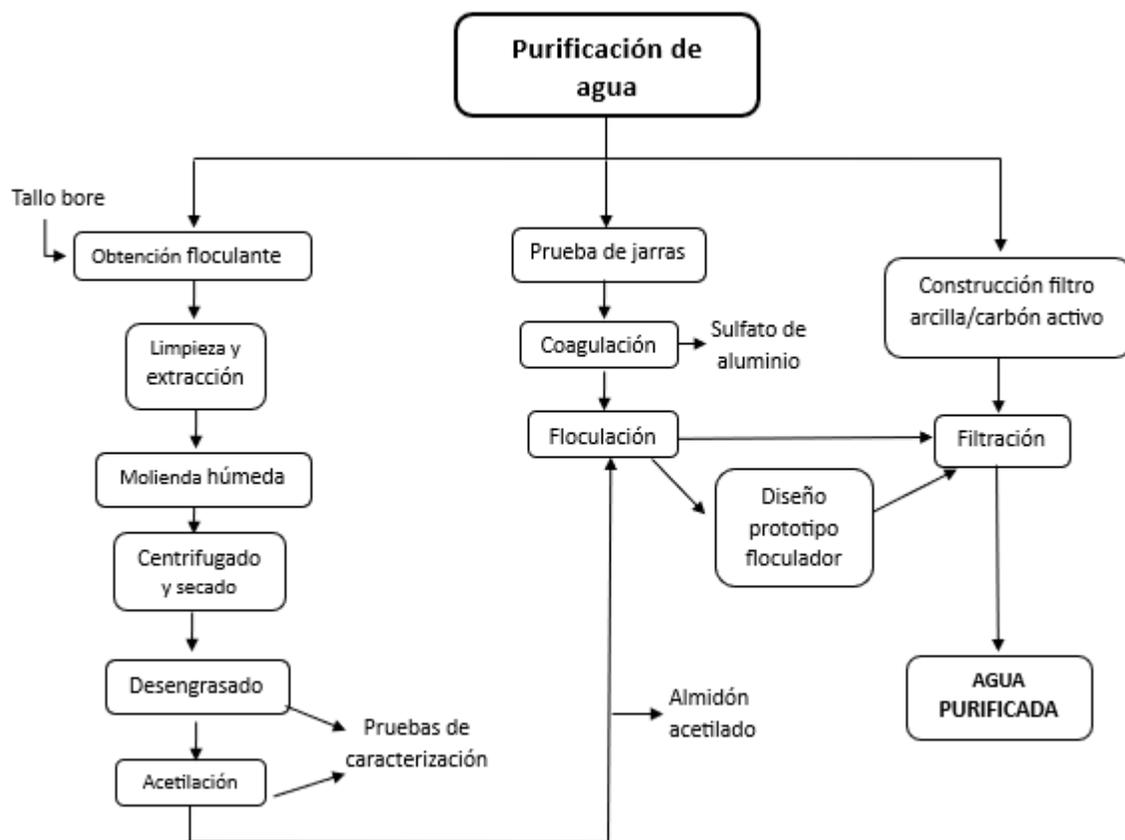
### **1.5.2 Objetivos específicos**

- Realizar la caracterización antes y después del tratamiento del almidón de bore (nativo y modificado), de la arcilla, del carbón activado y del agua para determinar sus propiedades fisicoquímicas.
- Realizar la extracción del almidón de bore y hacer su modificación química por el método acetilación con el fin de que este reaccione con el agua.
- Determinar la capacidad de floculación del almidón de bore acetilado en aguas de nacimiento mediante la prueba de jarras, para determinar las principales variables como turbidez, color, pH y conductividad eléctrica.
- Diseñar y elaborar un prototipo de filtro a base de carbón activado y arcilla, además determinar la capacidad de filtración de la arcilla y las propiedades antibacterianas del carbón activado al usarse en la potabilización de aguas.



## 2. Desarrollo experimental

Figura 2-1: Diagrama de flujo de la metodología empleada.



### 2.1 Extracción del almidón

Para la extracción del almidón se siguió la metodología propuesta por Pineda et al. 2014 [55], y se utilizó bore obtenido en una finca ubicada en la vereda Sipirra del municipio de Riosucio Caldas.

Se peló y se lavó el tallo de la planta del bore, después fue partido en cubos de aproximadamente  $1\text{ cm}^3$ , para posteriormente ser licuados en 3 ciclos de 20 segundos hasta que se degradó completamente, la lechada resultante se pasó por un tamiz de  $180\text{ }\mu\text{m}$ , este procedimiento se repitió 2 veces más, y luego se puso en decantación durante 12 horas, luego se centrifugó a 5000 rpm durante 30 minutos retirando el sobrenadante cada 15 min, posterior a esto se realizó el secado en un horno convencional a una temperatura de  $45^\circ\text{C}$  durante 8 h y finalmente se tamizó en una malla de  $120\text{ }\mu\text{m}$  hasta obtener un polvo homogéneo. Las muestras se dispusieron en bolsas resellables las cuales fueron almacenadas a temperatura ambiente.

**Figura 2-2:** Proceso de obtención del almidón de bore.



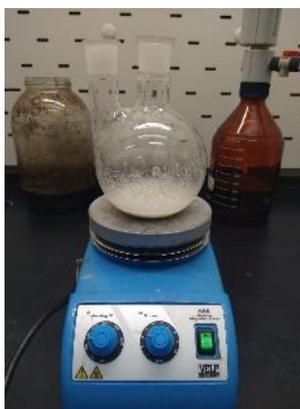
## 2.2 Modificación química del almidón

La modificación química del almidón se realizó siguiendo el método propuesto por Sulbarán et al 2018 et al [56], con algunas modificaciones. Se pesaron 40 g de almidón a los cuales se les agregaron 100 ml de agua destilada, después y con el fin de ajustar el pH a 8.0 se procedió a agregar NaOH al 3% en agitación constante, luego se agregaron gota a gota 10 ml de anhídrido acético manteniendo el pH y dejando en reposo por 10 minutos, posteriormente se adicionó una solución de HCL 0,5 N con el fin de ajustar el pH del sistema a 7.0, después de esto se procedió a centrifugar a 2,500 rpm durante diez minutos, después se lavó con agua y etanol tres veces, para su posterior secado en un horno a 45°C durante 8 horas.

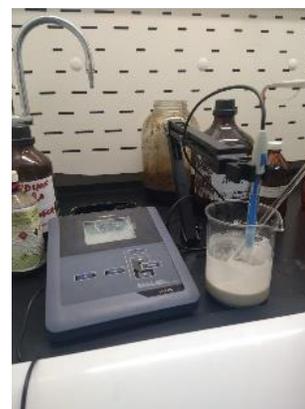
**Figura 2-3:** Proceso de acetilación del almidón de bore.



Pesaje del almidón



Reacción de acetilación



Ajuste de pH

## 2.3 Prueba de jarras para floculación

Una prueba de jarras, también conocida como ensayo de jarras es una técnica utilizada en el tratamiento de aguas para evaluar la eficiencia de la coagulación y la floculación. Esta prueba permite ajustar las dosis adecuadas de coagulantes y floculantes de acuerdo con el tipo y grado de contaminación del agua a tratar, así como evaluar la eficacia de estos tratamientos. Siendo un importante procedimiento en el diseño y operación de plantas de tratamiento de agua potable y aguas residuales.

Debido a que el agua objeto de estudio proviene de un nacimiento, se tomó una muestra inicial en una de las fuentes de captación de agua de nacimiento de la vereda Sipirra con

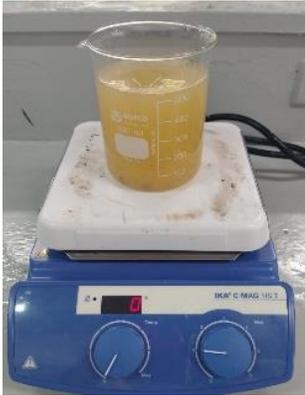
el fin de determinar las dosis óptimas de coagulante y floculante, y así identificar las cantidades necesarias de estos agentes para el tratamiento de este tipo de aguas.

Para realizar esta prueba se utilizó el equipo Jarras Phipps & Bird stirrer model 7790-400 con capacidad de hasta 6 jarras. Para los procesos consecutivos: coagulación y floculación, el en primero se utilizó sulfato de aluminio como coagulante (2.5 g diluidos en 500 ml de agua), y en segundo se utilizó el almidón acetilado como floculante.

En cada una de las jarras de floculación se dispusieron 1000ml de agua de nacimiento a analizar, y para determinar la dosis adecuada de coagulante a cada vaso se le añadió una diferente concentración de la solución de sulfato de aluminio obtenida previamente (2, 4, 6, 8, 10 ml), y se realizó una mezcla rápida durante 3 minutos a 120 rpm; y se les midió la turbidez y el pH. Después se procedió a realizar el proceso de floculación con el almidón acetilado, con el fin de determinar la dosis adecuada de este biopolímero se pesaron y agregaron 6 diferentes concentraciones del polvo de almidón en cada jarra (0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1 g). Este proceso se realizó en una mezcla lenta con una frecuencia de 25 rpm durante 20 minutos; posteriormente, las jarras se dejaron en un proceso de decantación, para después eliminar los flóculos por filtración. Finalmente se midió la turbidez mediante el turbidímetro LaMotte 2020e, y el pH con el pH metro Schott 4047802.

Después de determinar las dosis óptimas de coagulante y floculante en función de la evaluación del pH y turbidez, se procedió a repetir el mismo procedimiento agregando las dosis óptimas de coagulante y floculante a cada jarra, repitiendo cada ensayo 6 veces, para posteriormente llevar el agua a un proceso de decantación y filtración para realizar las respectivas caracterizaciones fisicoquímicas y microbiológicas.

**Figura 2-4:** Proceso de coagulación y floculación en equipo de jarras.



Preparación del coagulante



Proceso de coagulación-  
floculación en equipo de jarras



Formación de flóculos

## 2.4 Elaboración del prototipo de filtro de arcilla y carbón activado

Para la elaboración del filtro a escala se usó una vasija de arcilla (figura 2-5) fabricada por artesanas de la comunidad de portachuelo en el municipio de Riosucio caldas utilizando arcilla obtenida en esta misma comunidad; para ello se secó la arcilla al aire libre y se limpió el material orgánico presente en la muestra, después fue triturada a mano con piedras, se tamizó en un colador convencional, se remojó y se amasó para finalmente realizar el moldeado y llevar al horno casero que tienen las artesanas. El grosor de esta vasija es de 2 cm; el carbón activo que se usó es de tipo comercial.

El filtro se construyó como un sistema compuesto por el tanque y la vasija. El tanque que se usó es un recipiente plástico de 50 cm de altura y 25.5 cm de diámetro, con una capacidad de almacenamiento de 10 litros. La vasija de arcilla tuvo un espesor de 2 cm, la boca en la parte superior tiene un diámetro de 26 cm, la base tiene 18 cm, y 23 cm de profundidad. Dentro del tanque de almacenamiento se dispuso la vasija de arcilla, y dentro de esta se depositó una capa de 2cm de este agente filtrante.

**Figura 2-5:** Prototipo del sistema de filtración.



Disposición del sistema de filtrado y recolección del agua

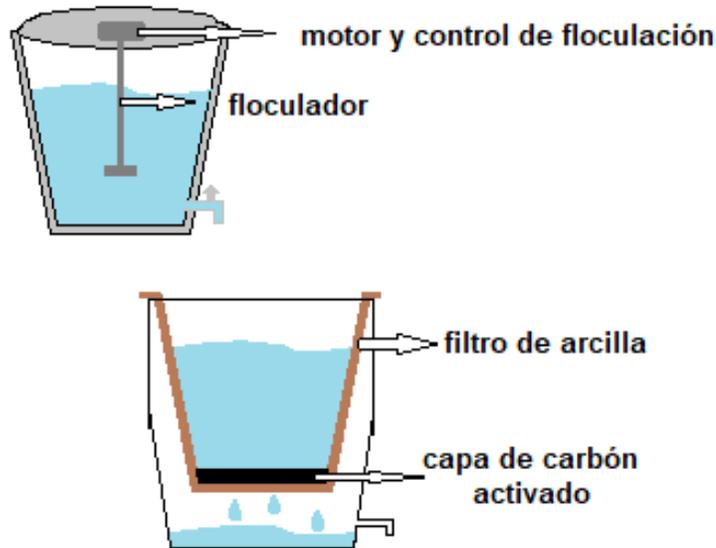


Filtro de arcilla

## 2.5 Proceso de filtración del agua

Después de determinar las mejores dosis de coagulante y floculante, se realizó nuevamente un ensayo de jarras utilizando el prototipo de coagulador-floculador con las dosis adecuadas de coagulante y floculante y se obtuvo una muestra de 6 litros de agua los cuales se recolectaron en un frasco estéril y se almacenaron a 6°C. Para realizar el proceso de filtración se aplicó una capa de 2.0 cm de carbón activado dentro de la vasija de arcilla y procedimos a agregar el agua recolectada anteriormente para su filtración; después repetimos el mismo procedimiento hasta completar 3 ensayos. El agua que pasó por el filtro fue recolectada en el tanque o recipiente de plástico, y mediante la llave que este tiene dispuesta procedimos a recolectar las muestras a las cuales se les realizaron las pruebas fisicoquímicas y microbiológicas.

**Figura 2-6:** Diseño del esquema de tratamiento del agua: Floculador, y filtro de arcilla-carbón activado.



## 2.6 Pruebas de caracterización

Se realizaron pruebas de caracterización físico químicas y microbiológicas del agua antes y después del tratamiento con el fin de determinar los cambios en las propiedades y en los parámetros más relevantes a la hora de evaluar la calidad del agua para consumo humano. También se caracterizó el almidón de bore nativo y modificado, mediante diferentes técnicas con la finalidad de determinar su composición química, su estructura, tamaño de grano, entre otros. Las técnicas que se utilizaron para la caracterización de los almidones fueron: Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), Difracción de rayos x (XRD), Microscopia electrónica de barrido (SEM), Análisis termo gravimétrico (TGA) y Calorimetría diferencial de barrido (DSC).

### 2.6.1 Pruebas fisicoquímicas del agua

Estas pruebas se llevaron a cabo en el laboratorio de química de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales, de acuerdo con la resolución 2115 del 2007 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial; los ensayos fisicoquímicos que se les

realizaron tanto al agua de referencia como a la filtrada basados en las normas APHA-AWWA-WEF/edición 23/2017 fueron:

**Tabla 2-1:** Determinación y métodos de medición de los parámetros fisicoquímicos del agua natural y tratada.

<b>Determinación</b>	<b>Método</b>	
Turbidez	Nefelométrico	
pH	pH-metro	
Alcalinidad	Volumétrico	SM 2320 AB – Ed.23/2017
Cloruros	Argentométrico	SM 4500-Cl AB – Ed. Ed.23/2017
Dureza total	Volumétrico-EDTA	SM 2340 AC - Ed.23/2017
Color aparente	Espectrofotométrico	SM 2120 AC – Ed.23/2017
Nitritos en aguas blancas	Colorimétrico	SM 4500-NO <sub>2</sub> AB – Ed.23/2017
Nitratos en aguas blancas	Espectrofotometría UV	SM 4500-NO <sub>3</sub> AB – Ed.23/2017
Mercurio	Vapor frio	SM 3500-Hg A ;3112 AB Ed. Ed.23/2017
Sulfatos	Turbidimétrico	SM 4500-SO <sub>4</sub> AE – Ed.23/2017
Aluminio	Absorción atómica de llama	SM 3500-Al A Ed.23/2017
Hierro	Absorción atómica de llama	SM 3500-Fe A ;3111AB Ed. Ed.23/2017
Manganeso	Absorción atómica de llama	SM 3500-Mn A ;3111AB Ed.23/2017

### 2.6.2 Pruebas microbiológicas del agua

Los ensayos microbiológicos que se les realizaron tanto al agua de referencia como a la filtrada se realizaron en el laboratorio de microbiología aplicada de la Universidad de Caldas, los cuales fueron: coliformes totales, coliformes fecales y Escherichia Coli por el método NMP; este método se basó en la dilución seriada de la muestra de agua y la posterior inoculación de cada dilución en los medios de cultivo específicos. Luego, se observó el crecimiento de las colonias bacterianas en cada uno de los tubos después de

un período de incubación adecuado. La concentración de microorganismos viables se estimó a partir del número de tubos positivos para cada dilución.

### **2.6.3 Microscopia electrónica de barrido (SEM)**

Para el análisis por microscopia electrónica de barrido se siguió la metodología propuesta por Pineda et al. 2014 [55]. La morfología del almidón de bore se estudió con un microscopio electrónico de barrido de alto vacío (JEOL, JSM-6060LV). Se realizó operando a 20 kV, con una resolución de 5 nm en modo de alto vacío y una presión de 12-20 Pa. Para la observación, los materiales se dispusieron en un porta muestras de cobre y fueron fijados con una cinta de carbón, luego fueron cubiertas con oro mediante un plasma de sputtering para hacer que las muestras fueran conductoras.

### **2.6.4 Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)**

Para obtener el espectro infrarrojo e identificar grupos funcionales en el almidón nativo y acetilado, se utilizó el equipo Bruker platinum ART. Se pesaron 0,1 g de almidón, se trituró y se mezcló con bromuro de potasio. Esta mezcla en polvo se comprimió en una prensa de troquel mecánica para formar una pastilla translúcida a través de la cual pudiera pasar el rayo de luz del espectrómetro. El espectro se realizó en la región de 370 a 4000  $\text{cm}^{-1}$  con una resolución de 4  $\text{cm}^{-1}$  y 10 barridos.

### **2.6.5 Difracción de rayos X (XRD)**

Para determinar la estructura de los materiales el equipo utilizado fue un Bruker D8 Advance. El material fue macerado hasta obtener un polvo fino, la difracción de rayos X de los materiales se tomó usando radiación  $\text{Cu K } \alpha$  a 40 kV, 14 mA y una longitud de onda de 1.54184 Å. El polvo se colocó en un soporte para medir el difractograma de rayos X, los datos se tomaron para valores de  $2\theta$  desde  $5^\circ$  a  $60^\circ$  con un paso de 0.02 grados.

### **2.6.6 Solubilidad en polvos**

Para determinar la solubilidad del almidón de bore nativo y acetilado se pesaron  $0.5 \pm 0.0001$  g de polvo ( $W_1$ ) y se adicionó en un tubo falcon, después se adicionaron 50 ml de

agua (medidos con pipeta volumétrica), los tubos se cerraron correctamente y se procedió a aplicar vortex a 24000 rpm/ 2 min. Después se centrifugó a 3100 rpm por 10 min. Se tomó una alícuota de 25 ml del sobrenadante (medidos con pipeta volumétrica), y se transfirió a caja una Petri (peso de la caja de Petri vacía  $W_2$ ), se sometió a calentamiento en una estufa convectiva a 105°C por 1 h. Finalmente se registró el peso de la caja Petri con la muestra después del calentamiento ( $W_3$ ). Esta prueba se realizó por triplicado.

El cálculo para el porcentaje de solubilidad se realizó mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Solubilidad} = \frac{W_3 - W_2}{W_1} \times 100 \times 2 \quad \text{Ec. 1}$$

### 2.6.7 Análisis termo gravimétrico (TGA)

Esta prueba se realizó con un equipo TGA Q500 de TA Instruments. Se mantuvieron  $10,2 \pm 0,5$  mg en un porta muestras de platino y se calentaron a una velocidad de 10 °C/min desde temperatura ambiente hasta 800 °C con atmósfera de nitrógeno. Los análisis de datos se llevaron a cabo utilizando el software Universal Analysis 2000 TA. Para esta prueba se realizó una calibración de temperatura; para esto se utilizó un estándar de níquel.

### 2.6.8 Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

El DSC se realizó con un equipo DSC Q100 de TA Instruments. Se pesaron  $1,2 \pm 0,5$  mg de la muestra de almidón y se colocaron en una capsula de aluminio con 4.8  $\mu$ L agua destilada, manteniendo una relación 1:5 de almidón-agua destilada, equivalente a 80 % de humedad. La charola se selló herméticamente y se calentó de 25 a 140 °C a una velocidad de calentamiento de 5 °C/min, teniendo una capsula vacía como referencia. La temperatura de inicio ( $T_0$ ), la temperatura máxima ( $T_p$ ), la temperatura final ( $T_e$ ) y la entalpía ( $\Delta H$ ) se obtuvieron del termograma utilizando el software Universal Analysis 2000 TA. El equipo se calibró para la temperatura y la entalpia con un estándar de indio. Las rampas de temperatura se realizaron bajo una atmósfera de nitrógeno con un flujo de 50 mL/min.





## **3. Resultados**

### **3.1 Análisis de coagulación floculación para agua de nacimiento con prueba de jarras**

La prueba de jarras es una prueba cualitativa, y es utilizada como una herramienta fundamental para determinar la dosis óptimas de coagulante y floculante, esta prueba también proporciona una indicación visual de la efectividad del tratamiento de coagulación-floculación. Para la determinación de la dosis óptimas de coagulante y floculante se evalúan el pH y la turbidez, ya que estos dos parámetros son esenciales para determinar la calidad del agua, proporcionan información valiosa sobre la alcalinidad y claridad del agua brindando información suficiente para identificar posibles problemas relacionados con su potabilidad y uso.

La estimación de la dosis óptimas de coagulante y floculante, dependerá del tipo de agua a tratar, ya que la efectividad de estos agentes depende de las condiciones iniciales, debido a que cada fuente de agua puede contener diferentes características y niveles de contaminantes, lo que afectará la cantidad de reactivos requerida para lograr un adecuado tratamiento del agua.

Las características fisicoquímicas iniciales de la muestra de agua de nacimiento obtenida se presentan en la tabla 3-1.

**Tabla 3-1:** Características iniciales del agua.

Parámetro	Valor
pH	7.80 ± 0.02
Turbidez (NTU)	1.63 ± 0.01

La evaluación del comportamiento del  $Al_2(SO_4)_3$  como coagulante se realizó en términos de la mejoría de la turbidez y el pH, en la tabla 3-2 se presentan los resultados para cada dosis de coagulante utilizada.

**Tabla 3-2:** Variación de la turbidez y el pH a diferentes dosis de coagulante.

Dosis coagulante ml/L	Turbidez (NTU)	pH
<b>2</b>	<b>1.54 ± 0.02</b>	<b>7.20 ± 0.02</b>
4	1.70 ± 0.02	7.00 ± 0.06
6	2.95 ± 0.01	6.80 ± 0.05
8	4.36 ± 0.01	6.60 ± 0.03
10	4.64 ± 0.02	6.20 ± 0.05

Según los resultados de la tabla 3-2 la remoción de turbiedad se requiere una dosificación de 2ml de coagulante por cada litro de agua para lograr una remoción del 5.5% de la turbiedad; mientras que los resultados del pH no son determinantes a la hora de elegir una dosis adecuada de coagulante, ya que la variación de este parámetro no fue significativa; además se puede apreciar que el aumento en la dosificación de este coagulante causa un aumento en la turbidez del agua, debido a que, cuando hay un exceso de iones de aluminio, puede resultar en la formación de flóculos demasiado densos y grandes, los cuales pueden acumular y atrapar otras partículas, lo que lleva a observar un aumento significativo de la turbidez.

Las tablas 3-3, y 3-4 presentan los resultados de la evaluación del almidón de bore modificado como floculante para la remoción de turbidez, y control del pH; cada una de estas tablas presenta valores de dichos parámetros antes y después de retirar los flóculos mediante un proceso de filtración.

**Tabla 3-3:** Determinación de la dosis óptima de floculante de acuerdo con la variación de la turbidez del agua filtrada y no filtrada.

<b>TURBIDEZ (NTU)</b>		
Dosis floculante g/L	No filtrada	Filtrada
<b>0.2</b>	<b>1.34 ± 0.01</b>	<b>1.07 ± 0.01</b>
0.4	4.22 ± 0.03	2.41 ± 0.01
0.6	2.82 ± 0.05	1.94 ± 0.02
0.8	3.93 ± 0.01	1.98 ± 0.01
1	8.18 ± 0.01	4.53 ± 0.01

**Tabla 3-4:** Determinación de la dosis óptima de floculante de acuerdo con la variación de la turbidez del agua filtrada y no filtrada.

<b>pH</b>		
Dosis floculante g/L	No filtrada	Filtrada
<b>0.2</b>	<b>7.05 ± 0.04</b>	<b>7.07 ± 0.01</b>
0.4	7.24 ± 0.01	7.31 ± 0.01
0.6	7.18 ± 0.02	7.44 ± 0.01
0.8	6.92 ± 0.01	6.98 ± 0.01
1	6.76 ± 0.01	7.83 ± 0.05

Los resultados anteriores indican que el proceso de filtración cumple la función de retirar los flóculos y se dan mejores resultados, se observa que al usar este floculante en una dosis de 0.2 gramos de almidón por cada litro de agua, conduce a valores de turbiedad para agua no filtrada de 1.34 NTU y para agua filtrada de 1.07 NTU, lo que nos indica que la turbidez puede disminuir aproximadamente en un 34%. En cuanto a los valores de pH se puede evidenciar que, a diferencia de algunos floculantes sintéticos, el almidón de bore no afecta significativamente el pH del agua debido a que por sus propiedades químicas el almidón es principalmente neutro, lo que significa que no libera ni consume iones hidrogeno en cantidades significativas.

Adicionalmente, con el fin de verificar la eficacia del almidón de bore modificado en distintos tipos de aguas, se realizó una prueba adicional de coagulación/floculación para una muestra de agua obtenida en la quebrada Manizales; las características fisicoquímicas iniciales de la muestra de agua objeto del estudio se presentan en la tabla 3-5.

**Tabla 3-5:** Características iniciales del agua proveniente de la quebrada Manizales.

Parámetro	Valor
pH	6.26 ± 0.02
Turbidez (NTU)	47.90 ± 0.04

Según la tabla 3-5, el valor promedio medido de la turbidez del agua de la quebrada Manizales indica un nivel significativo de partículas suspendidas, lo que sugiere que el agua contiene una cantidad considerable de sólidos suspendidos o partículas en suspensión; este nivel de turbidez podría deberse a diversas razones, como la presencia de sedimentos, materia orgánica, restos de alimentos, productos químicos, entre otros contaminantes. También se debe tener en cuenta que la turbidez puede variar significativamente dependiendo de varios factores, como la ubicación geográfica, las condiciones climáticas, el tamaño de la población servida, entre otros.

#### **Pruebas de mejor dosis de coagulante**

La evaluación del comportamiento del  $Al_2(SO_4)_3$  como coagulante se realizó en términos del pH y de la turbidez; en la tabla 3-6 se presentan los resultados para cada dosis utilizada.

**Tabla 3-6:** Comportamiento de la turbidez y el pH con diferentes dosis de coagulante.

<b>Dosis coagulante (ml/L)</b>	<b>Turbidez (NTU)</b>	<b>pH</b>
2	14.40 ± 0.02	6.36 ± 0.02
<b>4</b>	<b>9.58 ± 0.01</b>	<b>6.30 ± 0.02</b>
6	14.80 ± 0.05	6.32 ± 0.02
8	13.20 ± 0.07	6.42 ± 0.02
10	17.10 ± 0.01	6.45 ± 0.01

Según los resultados de la tabla 3-6, este coagulante muestra que en la remoción de turbiedad de aguas residuales se requiere una dosificación de 4ml/L para lograr una remoción del 80% de la turbiedad; mientras que los resultados del pH tampoco muestran una variación importante, por lo cual no se consideraron determinantes a la hora de elegir una dosis adecuada de coagulante.

### **Prueba de mejor dosis de floculante**

Las tablas 3-7, 3-8 y 3-9 presentan los resultados de la evaluación del almidón de bore modificado como floculante para la remoción de turbidez, control del pH y de la conductividad eléctrica; cada una de estas tablas presenta valores de dichos parámetros antes y después de retirar los flóculos mediante un proceso de filtración, según los resultados se logra evidenciar que realizar el proceso de filtración para retirar los flóculos arroja mejores resultados en la evaluación de los parámetros mencionados, se observa que al usar este floculante en una dosis optima de 0.6g/L, conduce a aportar beneficios apreciables en la calidad del agua tratada, arrojando valores de turbiedad para agua filtrada de 2.31 NTU y para agua no filtrada de 9,58 NTU, lo que nos indica que la turbidez puede disminuir aproximadamente en un 95%.

En cuanto a los valores de pH como indicativo de la cantidad de iones de hidrogeno disueltos, no presento cambios significativos en la calidad del agua, debido a que los floculantes orgánicos no tienen la capacidad de alterar significativamente el pH final del agua. Respecto a la conductividad eléctrica, no se aprecian cambios significativos en el

proceso, debido a que la conductividad eléctrica del agua está relacionada con la presencia de iones disueltos en ella, como los iones de sodio (Na<sup>+</sup>), cloruro (Cl<sup>-</sup>), entre otros. Los polímeros naturales como el almidón generalmente no afectan significativamente la concentración de iones en el agua, ya que no liberan iones de manera significativa ni afectan la ionización de los compuestos presentes. Cuando se utiliza almidón como floculante, su acción se centra en aglutinar partículas finas en el agua para formar flóculos más grandes. Este proceso físico no altera la cantidad sustancial de iones en el agua, y, por lo tanto, no produce un cambio significativo en la conductividad eléctrica.

**Tabla 3-7:** Comportamiento de la turbidez bajo diferentes dosis de floculante.

TURBIDEZ (NTU)		
Dosis floculante g/L	No filtrada	Filtrada
0.2	14.80 ± 0.01	4.31 ± 0.01
0.4	14.00 ± 0.07	4.61 ± 0.01
<b>0.6</b>	<b>9.58 ± 0.01</b>	<b>2.31 ± 0.01</b>
0.8	17.10 ± 0.02	3.56 ± 0.01
1	13.20 ± 0.01	3.63 ± 0.01

**Tabla 3-8:** Variación del pH bajo diferentes dosis de floculante.

pH		
Dosis floculante g/L	No filtrada	Filtrada
0.2	6.46 ± 0.01	6.28 ± 0.02
0.4	6.48 ± 0.01	6.38 ± 0.01
<b>0.6</b>	<b>6.53 ± 0.02</b>	<b>6.53 ± 0.02</b>
0.8	6.55 ± 0.01	6.60 ± 0.05
1	6.51 ± 0.01	6.59 ± 0.01

**Tabla 3-9:** Comportamiento de la conductividad eléctrica a diferentes concentraciones de pH.

<b>CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA <math>\mu\text{S}/\text{cm}</math></b>		
Dosis floculante g/L	No filtrada	Filtrada
0.2	330 $\pm$ 0.2	331 $\pm$ 0.2
0.4	336 $\pm$ 0.1	336 $\pm$ 0.3
<b>0.6</b>	<b>331 <math>\pm</math> 0.2</b>	<b>332 <math>\pm</math> 0.1</b>
0.8	327 $\pm$ 0.3	328 $\pm$ 0.1
1	331 $\pm$ 0.2	330 $\pm$ 0.2

La tabla 3-10, muestra los resultados de la evaluación de la demanda química de oxígeno (DQO) y del color aparente de las muestras que presentaron una mejor remoción de turbidez al usar almidón de bore como floculante (0.6g/L); estas mediciones fueron realizadas en el laboratorio de calidad del agua de la Universidad Nacional, sede Manizales. Los resultados indican que la demanda química de oxígeno como medida de la cantidad total de sustancias químicas oxidables presentes en el agua puede disminuir en un 14%, lo que se relaciona con una disminución de la carga orgánica del agua; a pesar de que el valor encontrado en el agua blanco supera los límites permisibles en la resolución 631 del 2015, donde el artículo 8 establece un límite máximo para el DQO de 180 O<sub>2</sub>/L en los vertimientos puntuales de aguas residuales domésticas, (ARD) de las actividades industriales, comerciales o de servicios; y de las aguas residuales (ARD y ARND) de los prestadores del servicio público de alcantarillado a cuerpos de aguas superficiales [57]; mientras que el color aparente muestra una reducción del 91% aproximadamente, la cual se correlaciona con la disminución de la turbidez del agua, ya que la acción del almidón como floculante favorece a la aglomeración de las partículas coloidales que pueden afectar la claridad del agua y, por lo tanto, su color aparente.

**Tabla 3-10:** Cambio de la demanda química de oxígeno y del color aparente.

DQO VALIDADA IDEAM mg O <sub>2</sub> /L			COLOR APARENTE U Pt-Co		
Blanco	No filtrada	Filtrada	Blanco	No filtrada	Filtrada
206.57	178.86	176.95	938.60	298.29	79.98

### 3.2 Pruebas de efectividad del filtro de arcilla y carbón activado

Al determinar las dosis óptimas del sulfato de aluminio (2ml/L) y de almidón de bore modificado (0.2g/L), se realizó un nuevo ensayo de jarras con una nueva muestra de agua obtenida del mismo nacimiento con el fin de determinar los cambios fisicoquímicos y microbiológicos del agua antes y después el tratamiento de coagulación, floculación y decantación/filtración, estos resultados se reportan en la tablas 3-11 y 3-12 respectivamente:

**Tabla 3-11:** Pruebas fisicoquímicas del agua después del proceso de filtración con arcilla y carbón activado.

Determinación	Unidades	Agua sin tratar	Agua tratada	Valor máximo aceptable	Método
Turbidez	NTU	2.34	1.37	2	Nefelométrico
pH		6.47	6.22	5.5 – 9.0	pH-metro
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> /L	32.25 ± 0.71	12.81 ± 0.28	200	Volumétrico
Cloruros	mg Cl/L	5.98 ± 0.48	4.91 ± 0.39	250	Argentométrico
Dureza total	mg CaCO <sub>3</sub> /L	46.08	27.08	300	Volumétrico- EDTA
Color aparente	U Pt- Co	1.39	ND	15	Espectrofotométrico

Nitritos en aguas blancas	$\mu\text{gNO}_2/\text{L}$	38.11	3.28	0.1	Colorimétrico
Nitratos en aguas blancas	$\text{mg NO}_3/\text{L}$	2.80	3.35	10	Espectrofotometría UV
Mercurio	$\mu\text{g/L}$	<LDI	<LDI	0,001	Vapor frio
Sulfatos	$\text{mg SO}_4/\text{L}$	14.24	1.22	250	Turbidimétrico
Aluminio	$\text{mg/L}$	<LCM	<LCM	0.2	Absorción atómica de llama
Hierro	$\text{mg/L}$	<LCM	<LCM	0.3	Absorción atómica de llama
Manganeso	$\text{mg/L}$	<LDI	<LDI	0.1	Absorción atómica de llama

Límites de Cuantificación del Método (LCM):  $\text{LCM}_{\text{ALUMINIO}}=1,86 \text{ mg Al/L}$ ;  $\text{LCM}_{\text{HIERRO}}=0,68 \text{ mg Fe/L}$ .

Límites de Detección del Instrumento (LDI):  $\text{LDI}_{\text{MANGANESO}}=0,0016 \text{ mg/L}$ ;  $\text{LDI}_{\text{MERCURIO}}=0,06 \mu\text{g/L}$

**Tabla 3-12:** Caracterización microbiológica del agua después del tratamiento de filtración con arcilla y carbón activado.

Determinación	Unidades	Agua sin tratar	Agua tratada	Valor máximo aceptable
Coliformes fecales	NMP/100ml	0	0	0
Escherichia Coli	NMP/100ml	0	0	0
<b>Coliformes totales</b>	<b>NMP/100ml</b>	<b>24</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

Según los resultados reportados en la tabla 3-11, se puede identificar que las aguas de nacimiento cumplen con algunos de los parámetros fisicoquímicos que establece el gobierno de Colombia en la “resolución 2115 del 2007, por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano”

La turbidez es un parámetro que mejoró en un 41% aproximadamente y que incluso se encuentra muy por debajo del máximo aceptable, lo que representa una reducción considerable en virtud de que una de las principales ventajas de este tipo de floculantes orgánicos es que debido a su estructura polimérica le permite actuar como un agente de

floculación eficiente, ya que cuando se agrega al agua, el almidón se dispersa y forma redes moleculares que pueden atrapar y unir partículas finas y coloides suspendidos en el agua; además la capacidad del filtro de absorber contaminantes y microorganismos que pueden producir turbidez en el agua garantiza que este parámetro tenga una buena reducción respecto al agua base.

El pH del agua tratada se mantuvo en el rango establecido y no presento variaciones importantes respecto al agua blanco, ya que, durante la floculación y filtración, el agua no se expone a una liberación o consumo de iones de hidrogeno por parte de los materiales utilizados para su tratamiento. La alcalinidad del agua presento una reducción del 60.3% y hace referencia a la capacidad que tiene esta para resistir cambios en el pH; como medida de la concentración de iones hidróxido ( $\text{OH}^-$ ) y bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) que pueden estar presentes en el agua, y que son responsables de neutralizar los ácidos y mantener el pH del agua en un rango determinado; se puede indicar que el tratamiento realizado logró la reducción mencionada debido a que la arcilla puede tener una pequeña influencia en la alcalinidad del agua debido a su capacidad para adsorber o liberar iones de alcalinidad, por esta razón se establece que el filtro de arcilla fue el encargado de mejorar la alcalinidad del agua a pesar de que esta se encuentre dentro del máximo establecido; el carbón activado y el almidón de bore como floculante no afectaron directamente la alcalinidad del agua debido a su proceso de adsorción de contaminantes.

Los cloruros también son importantes en la evaluación de la calidad del agua potable, ya que su presencia es necesaria para mantener el equilibrio iónico y el sabor del agua. Al estudiar los resultados obtenidos se observa una disminución del 17.9% de los cloruros presentes en el agua tratada; esta disminución puede estar atribuida a los materiales utilizados en el tratamiento. Cuando se usa almidón como floculante, se pueden formar complejos de almidón y cloruros en el agua, esto podría resultar en la eliminación parcial de los cloruros, ya que algunos de ellos pueden unirse a los floculados y ser removidos durante el proceso de sedimentación. El filtro de arcilla y carbón puede afectar los cloruros presentes en el agua, ya que estos tienen la capacidad de eliminar algunos cloruros presentes en el agua mediante un proceso de adsorción.

La dureza del agua es una medida de la concentración de sales de calcio y magnesio presentes en ella. Cuando hablamos de agua proveniente de nacimientos o fuentes naturales, la dureza puede variar dependiendo de las características geológicas del área y el tipo de rocas o minerales presentes en el suelo. Aunque la dureza del agua no está directamente relacionada con su potabilidad o seguridad para el consumo humano; los resultados de la tabla 3-9 nos indican que tanto el agua blanco como el agua tratada tienen una cantidad de  $\text{CaCO}_3$  menor a 60 mg/L por lo que se pueden clasificar como aguas blandas, mostrando una disminución del 41.2% al realizar el tratamiento de filtración previa floculación.

El color aparente del agua blanco presentó un valor de 1.39 U Pt- Co, pero después del tratamiento no se pudo determinar el color aparente del agua filtrada, esto pudo deberse a que el método espectrofotométrico no tuvo la capacidad de determinar el valor correspondiente a esta característica, debido a la baja concentración de color en la muestra tratada con floculante y el filtro, por lo cual se reporta como no determinado (ND). Se debe tener en cuenta que el color aparente en las aguas de nacimiento o provenientes de fuentes naturales de agua es un indicador importante de su calidad y salud. El color del agua puede variar según la presencia de diferentes sustancias disueltas o suspendidas en ella, y puede proporcionar información valiosa sobre la composición química y la posible contaminación del agua; la indeterminación del color aparente del agua tratada muestra nuevamente que la capacidad de los materiales para absorber partículas suspendidas en el agua es muy alta.

La presencia de nitritos y nitratos en las muestras de agua estudiadas es relativamente baja debido a que a pesar de que la información obtenida para estos parámetros se encuentra dentro de los valores máximos aceptables podemos decir que, al comparar los datos obtenidos en la evaluación de los nitritos se observa que el tratamiento muestra una eficacia en la reducción de este parámetro en un 91.4% aproximadamente, lo que representa que el uso de floculante orgánico y del filtro de arcilla de carbón activado es útil en la disminución de este parámetro debido a que los nitritos representan un problema cuando se encuentran en concentraciones excesivas en el agua potable, ya que pueden reaccionar con compuestos químicos presentes en el cuerpo humano para formar nitrosaminas, que son sustancias potencialmente cancerígenas. Además, su presencia puede deberse a la descomposición de materia orgánica o a la escorrentía de áreas agrícolas donde se utilizan fertilizantes nitrogenados. Por otra parte, se observa que, con

el tratamiento aplicado al agua, los nitratos presentan un aumento del 16% en el agua tratada, estos resultados pueden deberse a la reducción microbiana, ya que los nitratos tienen la capacidad de convertirse en nitritos, por lo que posiblemente la reducción de nitritos tenga relación directa con el aumento de nitratos.

El diagnóstico de la presencia de metales pesados en el agua blanco y en el agua tratada (mercurio, aluminio, hierro y manganeso) arroja valores menores a los límites de cuantificación del método (LCM) y a los límites de detección del instrumento (LDI), por lo cual no se establece una cuantificación exacta de las cantidades de dichos metales en las aguas objeto de estudio, lo que no nos permite realizar una adecuada evaluación de la efectividad del tratamiento aplicado.

La observación de los sulfatos presentes en las aguas estudiadas indica que el agua tratada presento una reducción del 91.4% de este parámetro, y aunque los valores se encuentran en el rango establecido, esta reducción supone una buena interacción de los sulfatos con el carbón activado y la arcilla; y aunque el carbón tiene una capacidad limitada en la retención de sulfatos, la arcilla dependiendo de su naturaleza puede adsorber sulfatos y otros iones, ayudando a reducir su concentración en el agua.

En cuanto a los parámetros microbiológicos reportados en la tabla 3-10 se pudo establecer que el agua sin tratamiento presenta contaminación por coliformes totales (24NMP/100ml), pero no presenta E. Coli, ni coliformes fecales lo que descarta la contaminación fecal humana. Los resultados reportados en la tabla 3-12, indican que la muestra de agua tratada con floculante y filtración mediante arcilla y carbón activado no presenta coliformes totales, fecales ni E. Coli; por lo que se puede considerar que el tratamiento es eficaz para eliminar coliformes presentes en el agua. Además, se puede considerar que este nacimiento de agua posee baja contaminación debido a su poca intervención antrópica, también se puede considerar que los procesos de conservación realizados por la comunidad y de los entes responsables de velar por la calidad de los recursos naturales conducen a que estas aguas posean una baja contaminación fisicoquímica. Aunque la presencia de coliformes totales en el agua no presenta un alto riesgo para la salud humana, estas, están presentes de manera natural en el medio ambiente, y nos pueden indicar que

pueden estar presentes otros organismos potencialmente perjudiciales, como bacterias y virus, que pueden afectar a las personas inmunodeprimidas, ancianos, embarazadas y niños. Por lo cual se puede afirmar que el uso del filtro de arcilla y carbón activado es útil en los procesos de descontaminación de agentes microbianos, virus y bacterias presentes en el agua, puesto que cuando el carbón activado está en contacto con el agua contaminada con microorganismos, estos pueden quedar atrapados en sus poros, reduciendo su concentración en el agua tratada; asimismo como la arcilla tiene una superficie cargada negativamente, esto permite que pueda atraer y retener partículas cargadas positivamente, como bacterias y otros microorganismos.

### **3.3 Pruebas de caracterización fisicoquímicas del almidón**

Conocer las propiedades fisicoquímicas del almidón de bore es de gran importancia debido a la amplia gama de aplicaciones que tiene este polisacárido y a su relevancia en diversas áreas de estudio. Algunas de las razones fundamentales por las que el estudio del almidón de bore es relevante desde el punto de vista científico son: conocer sus propiedades y comportamiento en diferentes condiciones, ya que esto es esencial para desarrollar productos con características específicas. Investigar cómo modificar y mejorar las propiedades del almidón permite conocer sus propiedades químicas y físicas y así desarrollar de nuevos materiales sostenibles.

#### **3.3.1 Análisis de morfología por microscopía electrónica de barrido (SEM)**

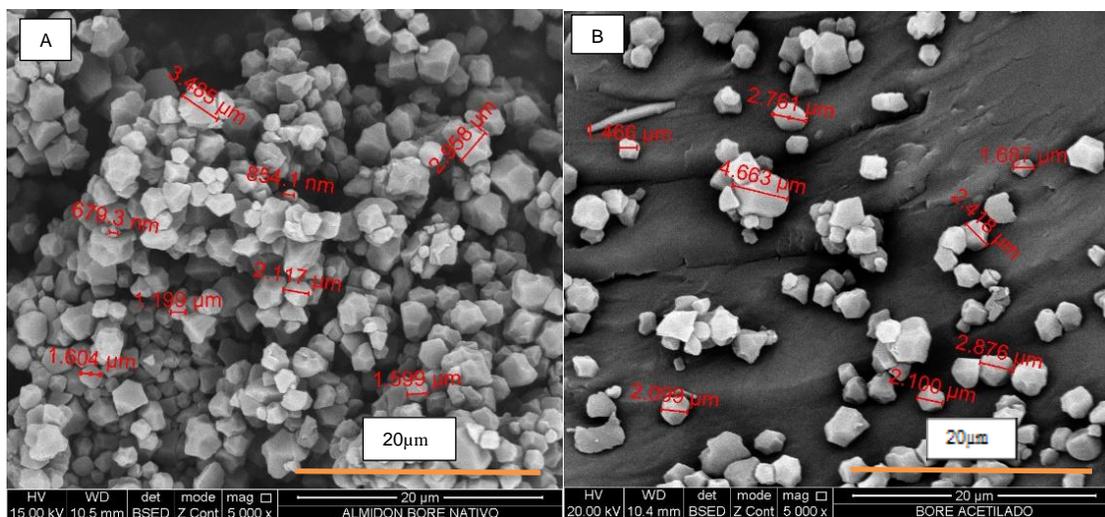
La bioquímica, así como la fisiología de la planta determinan los diferentes polimorfismos de los almidones. SEM es una técnica muy usada para determinar cambios estructurales en los gránulos de almidón. Esta propiedad estructural, llamada morfología, es una de las propiedades físicas más importantes del almidón, puesto que ayuda a determinar y predecir cómo será su comportamiento y cuáles son las variaciones que se presentan entre las diferentes fuentes [58]. El SEM permite obtener imágenes tridimensionales y de alta resolución de la estructura de los gránulos de almidón, revelando detalles internos y superficiales que no son visibles con microscopios ópticos convencionales. De esta

manera, el SEM de almidón puede proporcionar información detallada sobre la forma, tamaño, estructura y textura de los gránulos de almidón, los cuales son parámetros claves a la hora de evaluar la efectividad del almidón como floculante, debido a que partículas de almidón uniformes en tamaño pueden formar flóculos más homogéneos, lo que contribuye a una floculación más eficiente. La variabilidad en el tamaño de partícula puede afectar la capacidad del almidón para cubrir y unir partículas en suspensión porque afecta directamente su capacidad para interactuar con otras partículas y formar flóculos. Un almidón con una morfología bien definida y propiedades superficiales específicas puede ser más efectivo en la clarificación y floculación del agua.

La figura 3-1 muestra las imágenes SEM de gránulos de almidón de bore nativo y modificado respectivamente, tomadas a 5000x. Se identifican gránulos pequeños poliédricos, con superficies lisas, y tamaños que oscilan entre 0.6 $\mu$ m hasta 4.6 $\mu$ m aproximadamente. Los gránulos de almidón acetilado no presentan diferencias morfológicas con respecto al almidón nativo, lo cual indica que la acetilación produjo cambios principalmente en las macromoléculas interiores del almidón. Quintero et al. [59] reportan que los gránulos de este almidón son partículas con formas esféricas y ovoides con diámetros de entre 5 y 15  $\mu$ m y una superficie lisa. Londoño et al. [60] estudiaron la morfología del almidón de *Xanthosoma*, y reportan gránulos con forma y tamaño variable y dimensiones entre 2 y 7 $\mu$ m. De acuerdo con los reportes de estos autores se puede evidenciar que los gránulos de almidón provenientes de fuentes de la familia de las aráceas son considerablemente pequeños a comparación de otras fuentes botánicas como la papa, yuca o maíz, aunque la especie macrorrhiza según los reportes, presenta los gránulos de almidón más pequeños de la familia a la cual pertenece. La morfología de los gránulos de almidón puede ser atribuida al origen botánico, a la morfología de los amiloplastos, el grado de maduración del fruto y la fisiología de la planta [61], además de las condiciones ambientales en las cuales se cultivan las plantas. Quintero Castaño et al. [62] indican que el tamaño del grano de almidón tiene una influencia sobre las propiedades funcionales, mientras más pequeños sean los gránulos, mayor es su digestibilidad y son considerados como los más resistentes a procesos con altas temperaturas como la esterilización. Paredes López et al. [63], determinaron que almidones con gránulos pequeños pueden

absorber mayor cantidad de agua que los gránulos grandes debido a que estos poseen mayor área de contacto. Los resultados morfológicos y la evaluación del tamaño granular del almidón de bore también indican que este además de ser útil como floculante, también presenta ventajas frente a otros almidones ya que los almidones con gránulos pequeños tienen un área superficial mayor en comparación con los almidones de gránulos más grandes; lo que aumenta su capacidad de adsorber partículas en suspensión y mejorar la formación de flóculos; además pueden gelatinizar más rápido debido a su menor tamaño, lo que resulta en una floculación más rápida y eficiente; además presenta una mejor distribución en el agua debido a su menor tamaño, lo que conduce a una floculación más uniforme y homogénea.

**Figura 3-1:** A) Micrografía almidón de bore nativo. B) Micrografía almidón de bore acetilado.



### 3.3.2 Determinación de los grupos funcionales del almidón de bore mediante espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

FTIR es una técnica analítica ampliamente utilizada para estudiar la composición molecular de diversos materiales, incluyendo los almidones. Mediante esta técnica, se obtiene un espectro infrarrojo del almidón que muestra las vibraciones moleculares asociadas a los enlaces químicos presentes en la muestra. El espectro infrarrojo de los almidones revela información sobre los grupos funcionales y las estructuras moleculares presentes en estas

moléculas de carbohidratos; mostrando diferentes bandas de absorción que corresponden a los diferentes grupos funcionales presentes en el almidón, como los enlaces C-H, O-H, C-O, C=O y C-C; además, si el almidón ha sido sometido a modificaciones químicas, como la acetilación o la esterificación, el espectro infrarrojo puede mostrar cambios característicos en las bandas de absorción, lo que indica la presencia de grupos químicos adicionales. Esto es crucial para comprender cómo las alteraciones químicas afectan las propiedades físicas y funcionales del almidón en aplicaciones específicas como la efectividad del almidón como floculante, ya que al crearse sitios activos en el almidón este puede mejorar su solubilidad en agua fría.

La tabla 3-13 muestra algunas de las bandas características de los almidones en el espectro FTIR, según lo reportado en la literatura:

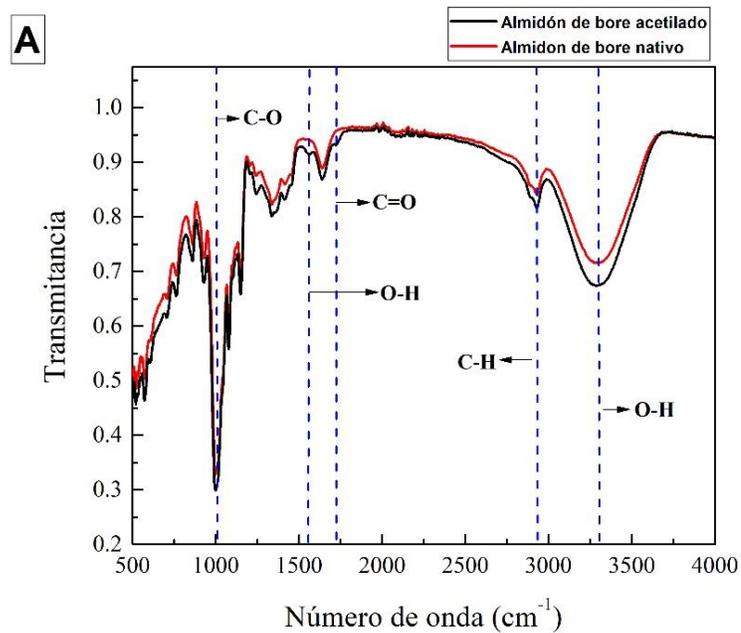
**Tabla 3-13:** Bandas específicas de los almidones en el espectro FTIR.

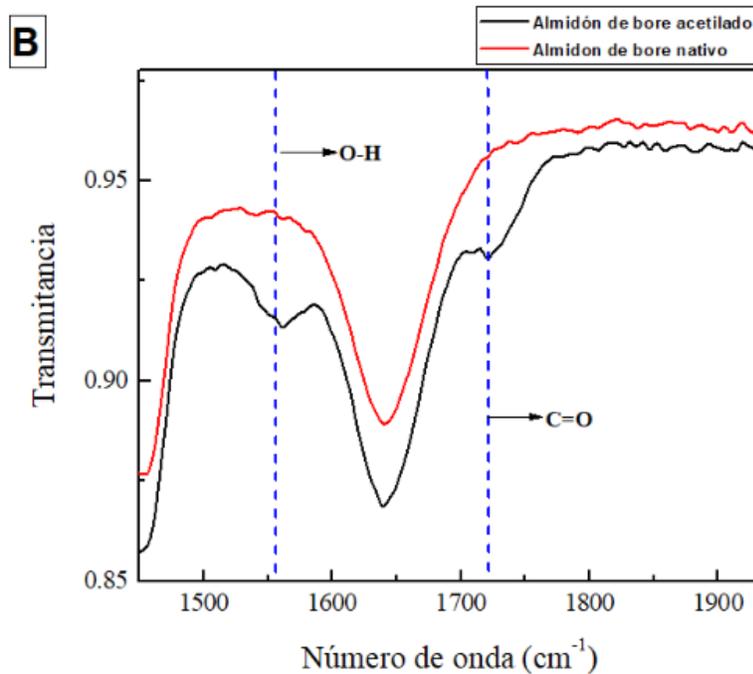
Banda	Numero de onda (cm <sup>-1</sup> )
C-OH	1020
C-O-C	1100
C=C	1600
C-H	2900-3000
O-H	3300-3500

La figura 3-2 muestra los espectros FTIR del almidón nativo y acetilado. Los espectros de los almidones de bore (nativo y modificado) mostraron bandas correspondientes al estiramiento de los principales grupos característicos presentes en el almidón [64] como se puede comprobar comparando los datos de las gráficas con los reportados en la tabla 3-13. Al contrastar ambos espectros se encuentra coincidencia en casi todas las bandas, donde la señal observada a 2920 cm<sup>-1</sup> corresponde a las vibraciones de los enlaces C-H de los grupos metilos y la banda que aparece a 3300 cm<sup>-1</sup> se debe a los estiramientos de los enlaces O-H de los grupos hidroxilos presentes en el almidón [65]. La señal observada en 1005 cm<sup>-1</sup> se encuentra asociada a la vibración de estiramiento del enlace C-OH en la

estructura del almidón. Para una mejor observación, en la figura 1(b) se presenta una ampliación del espectro donde claramente se observa que el almidón acetilado originó una banda mucho más pronunciada en  $1560\text{ cm}^{-1}$ , a causa de las vibraciones por doblamiento del grupo O-H debido a la introducción de los grupos acetilo en el almidón, comprobando que el proceso de acetilación fue efectivo. Adicionalmente, se observó un incremento en la intensidad a  $1720\text{ cm}^{-1}$  en el almidón acetilado, esta señal es característica de los modos vibracionales en los grupos carbonilo presentes en el almidón acetilado [50]. Con este espectro podemos concluir que el proceso de acetilación produjo sitios activos en el almidón para permitir que este pueda ser utilizado como floculante en la limpieza de aguas.

**Figura 3-2:** A) FTIR del almidón de bore y B) ampliación de las bandas modificadas.





### 3.3.3 Estructura del almidón de bore, mediante difracción de rayos X (XRD)

Un difractograma muestra la información sobre la estructura cristalina y la disposición de los gránulos de almidón en una muestra. Los difractogramas de almidones son únicos, los cuales generalmente exhiben una estructura semicristalina debido a que la amilosa y la amilopectina se encuentran formando partes amorfas y cristalinas; los difractogramas pueden variar según la fuente de la planta de la que se extrae el almidón y la forma en que se procesa.

Realizar un análisis de cristalinidad a los almidones modificados tiene como propósito evaluar si la introducción de grupos acetilo puede cambiar la disposición de las cadenas de almidón, y evaluar su influencia en la capacidad para formar flóculos y aglutinar partículas en el agua durante el proceso de floculación.

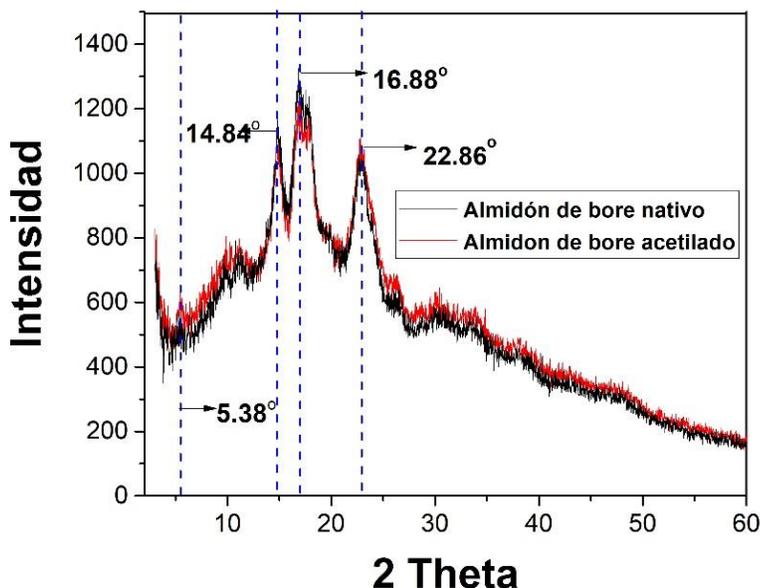
Se encuentra reportado que los gránulos de almidón nativos exhiben tres tipos principales estructura determinados por difracción de Rayos X [62]. El sistema cristalino de los

gránulos de almidón de tipo A es ortorrómbico con picos característicos en  $2\theta = 15^\circ$  y  $23^\circ$ . El tipo A corresponde típicamente a almidones de plantas como el maíz y el trigo. El almidón tipo B muestra un patrón de difracción con un solo pico ancho, que se encuentra generalmente alrededor de  $2\theta = 17^\circ$ . Este tipo de almidón tiene una estructura cristalina intermedia entre el almidón de tipo A y el almidón de tipo C y se encuentra comúnmente en tubérculos como la yuca o fuentes ricas en amilosa. Por último, el otro tipo de almidón es el C, el cual se muestra como una mezcla de estructuras A y B, el almidón de tipo C exhibe un patrón de difracción con un pico amplio característico, conocido como el pico C, que se encuentra alrededor de  $2\theta = 20^\circ$ . El almidón de tipo C tiene una estructura cristalina menos ordenada y es característico de la mayoría de los almidones de legumbres y también de cereales que crecen en condiciones específicas de temperatura e hidratación [62].

Para almidón nativo y modificado de bore se obtuvieron los difractogramas de rayos -X como se presentan en la figura 3-3. Estos patrones se caracterizan por la presencia de picos de difracción amplios, comúnmente atribuidos a la presencia de estructuras semicristalinas en el almidón. Sin embargo, Londoño-Restrepo et al. [66] demostraron que el ensanchamiento se relaciona con la presencia de nanocristales. Cuando los rayos X alcanzan los nanocristales, dispersan el haz de manera elástica e inelástica simultáneamente [67], lo que resulta en el ensanchamiento de los picos.

Observando los difractogramas, ambos almidones presentaron un patrón de difracción con picos característicos a  $2\theta = 5.38^\circ$ ,  $14.84^\circ$ ,  $16.88^\circ$  y  $22.86^\circ$ . Los picos a  $5.38^\circ$  y  $16.88^\circ$  son típicos de los difractogramas de los almidones de tipo B, además, los picos en  $14.84^\circ$  y  $22.86^\circ$  exhiben características comunes con los almidones de tipo A. Por lo cual al comparar lo reportado teóricamente con los resultados obtenidos para la caracterización del almidón de bore, se puede indicar que este almidón se puede clasificar como un almidón tipo C ya que este es típico de almidones se presentan como una mezcla de almidones tipo A y B, por lo cual no tiene una estructura cristalina definida. Desde un punto de vista cristalográfico el origen del pico cercano a  $5^\circ$  es aún un problema abierto y podría estar relacionado con la presencia de nanocristales en la estructura.

**Figura 3-3:** Difractograma del almidón de bore nativo y modificado.



Comparando los resultados, Quintero et al., 2016 [59] reportan que el almidón de dos tubérculos (bore y de yuca) presentaron el pico máximo a  $16.82^\circ$  y  $16.98^\circ$ , respectivamente; además, se presentaron picos de menor intensidad a  $20.80^\circ$ ,  $22.86^\circ$  y  $24.20^\circ$  para el almidón bore y  $19.70^\circ$ ,  $22.8^\circ$  y  $24.2^\circ$  para el almidón de yuca; como resultado, dichos autores clasifican el almidón de estos tubérculos como tipo B, a pesar de que estos almidones también presentan picos característicos de almidones de tipo A. Sin embargo, es importante tener en cuenta que puede haber variaciones en la estructura cristalina y las propiedades funcionales del almidón dependiendo de la especie, el suelo de cultivo y el procesamiento específico de las fuentes.

Salcedo et al., 2016 [68] presentaron los patrones de difracción de almidones nativos y acetilados de yuca y ñame; donde el almidón nativo de yuca mostró un patrón de difracción tipo A, con picos de difracción de mayor intensidad en los ángulos  $2\theta$  de  $15^\circ$ ,  $17^\circ$ ,  $18^\circ$  y  $23^\circ$ ; mientras que el almidón nativo de ñame presentó un patrón de difracción tipo B debido a la presencia de picos característicos de mayor intensidad en los ángulos  $2\theta$  de  $5^\circ$ ,  $6^\circ$ ,  $17^\circ$ ,  $22^\circ$  y  $24^\circ$ ; Los almidones acetilados de yuca y ñame, mantuvieron los patrones de

difracción característicos de almidones nativos, indicando que gran parte de los grupos acetilos se introdujeron principalmente en las regiones amorfas del granulo. Xu y col., 2004 [69] reportan que almidones de maíz con bajo GS muestran perfiles de cristalinidad similares al del nativo.

Finalmente, al comparar la estructura cristalina del almidón de bore nativo y acetilado no se evidencian diferencias en sus difractogramas por lo cual se puede indicar que la acetilación no modifica la estructura cristalina del material.

### **3.3.4 Solubilidad del almidón de bore**

La solubilidad en polvos, como el almidón, se refiere a la capacidad que estos pueden tener para disolverse en un líquido, generalmente agua, formando una mezcla homogénea. El grado de solubilidad del almidón depende de ciertos factores como: La temperatura, ya que el almidón tiene una mejor solubilidad en agua caliente en comparación con agua fría. Al calentar el agua, se rompen las interacciones entre las moléculas de almidón, permitiendo que se disuelva más fácilmente. La concentración de almidón en la solución también puede afectar su solubilidad. A concentraciones más altas, es posible que el almidón no se disuelva completamente y forme una suspensión o gel en lugar de una solución verdadera. Agitar la mezcla puede mejorar la solubilidad al aumentar la interacción entre las partículas de almidón y el líquido. Es importante tener en cuenta que las propiedades del almidón también pueden presentar ligeras variaciones dependiendo de la fuente botánica, por ejemplo, el almidón de maíz y el almidón de papa pueden tener comportamientos de solubilidad ligeramente distintos.

La solubilidad de equilibrio a temperatura constante de una sustancia es la solubilidad de su forma más estable en equilibrio con su solución y es la forma en que se obtiene el más alto punto de fusión. La solubilidad de un polvo está directamente relacionada con su microestructura. Las formas cristalinas y amorfas de las superficies de los polvos presentan diferencia en los tamaños y forma de las partículas, las propiedades químicas, su estabilidad química, la solubilidad en agua y la higroscopicidad [70]. A mayor grado de superficies amorfas, se incrementa la solubilidad de los polvos en agua y a mayor presencia del estado cristalino, se disminuye su solubilidad ya que le confiere una mayor organización de las partículas [70]. Los sólidos amorfos tienen una mayor solubilidad y velocidad de disolución, que la del estado cristalino.

La tabla 3-14 muestra los porcentajes de solubilidad encontrados mediante la Ec.1 para las muestras de almidón nativo y modificado:

**Tabla 3-14:** Porcentaje de solubilidad de las muestras de almidón

<b>Muestra</b>	<b>% Solubilidad</b>
Almidón nativo	1.1295 ± 0.2944
Almidón acetilado	9.6030 ± 0.2710

Los resultados de la tabla 3-14 indican que el almidón nativo presenta aproximadamente un 1.13% de solubilidad en agua fría, mientras que el almidón acetilado presenta una solubilidad aproximada de 9.60%. Estos resultados presentan diferencias significativas entre sí, ya que estos valores nos indican que el proceso de modificación química aumentó la solubilidad del almidón, debido a una mayor captación de moléculas de agua y a la ruptura de los enlaces de hidrógeno, que produce una mayor movilidad de las cadenas poliméricas (amilosa y amilopectina) y la lixiviación de la amilosa (Ali & Hasnain) [71]. Estos valores tendrían una correlación significativa con el contenido de los grupos acetilo incorporados en la molécula del almidón.

Pohja et. al 2004 [72] evaluaron el efecto del grado de sustitución en el almidón de arracacha, los autores explican que los bajos niveles de acetilación generan la apertura de la estructura del almidón de arracacha haciéndola más accesible al agua, indicando que la solubilidad no está determinada por la cantidad de amilosa presente en el almidón.

Singh et al 2005 [73] reportaron que almidones de papa de la india nativos y acetilados con un alto grado de sustitución, presentaron porcentajes de solubilidad del 10.2% y 19,2% respectivamente, por lo que al comparar estos valores con los resultados obtenidos los porcentajes de solubilidad obtenidos para el almidón de bore son adecuados, teniendo en cuenta que el grado de sustitución de acuerdo con el tiempo de reacción fue bajo.

### 3.3.5 Degradación térmica del almidón de bore. Análisis por termogravimetría (TGA)

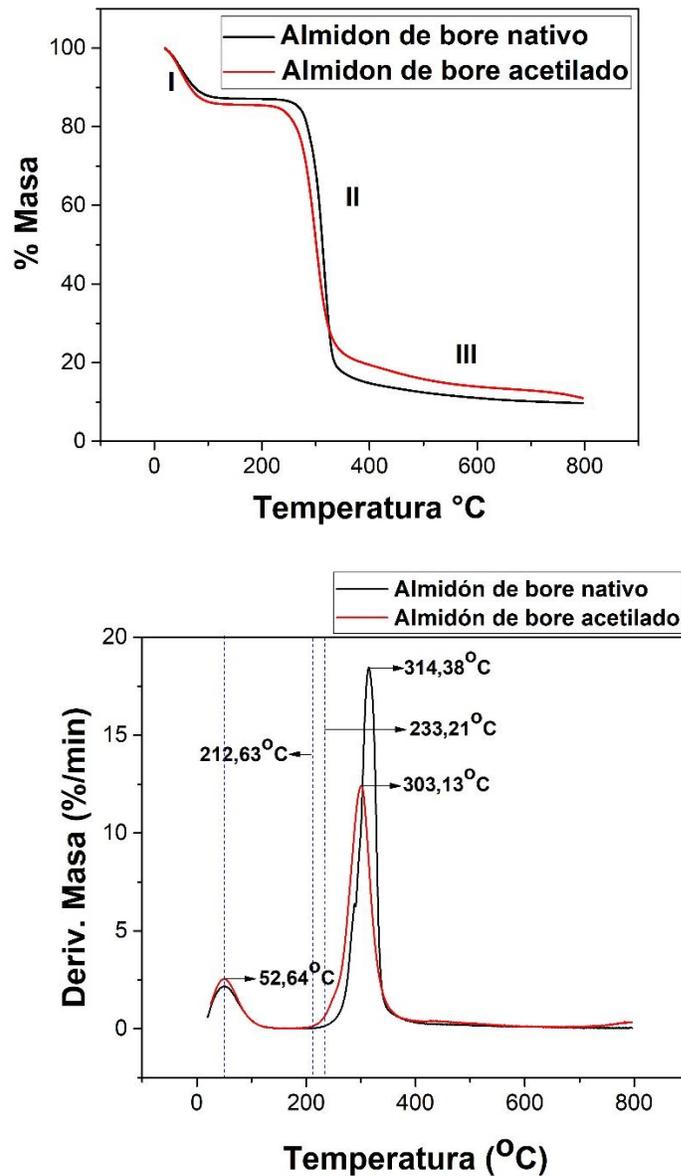
Un análisis termogravimétrico (TGA) es una técnica utilizada para estudiar la descomposición y pérdida de peso de un material a medida que se somete a un aumento controlado de temperatura. En el caso de los almidones, un análisis termogravimétrico proporciona información valiosa sobre su comportamiento térmico y su estabilidad a diferentes temperaturas.

La figura 3-4, muestra la pérdida de masa en función de la temperatura en un muestra el termograma TGA para el almidón nativo y acetilado de bore, estas curvas muestran la presencia de tres eventos característicos en la degradación de muestras de almidón sometidas a un análisis termogravimétrico. En una primera etapa cuando  $T < 100^{\circ}\text{C}$ , hay pérdida aproximada de masa del 12.2% para el almidón nativo y 14% para el almidón modificado, la cual representa la humedad contenida en la muestra. En la segunda etapa el almidón nativo presenta una pérdida de masa de 68.34%, dicho proceso ocurre entre 250 y 340°C aproximadamente, para el almidón modificado se observa una pérdida de masa de 60.37%, en el intervalo entre 230 y 340°C, esta etapa, corresponde a la degradación del almidón, es decir su parte orgánica (amilosa, amilopectina, proteína y algunos lípidos). La figura 3-4, muestra las curvas de DTGA de los almidones, donde se observan dos picos importantes en 314°C y 303°C para el almidón nativo y modificado respectivamente, dicho pico corresponde a la temperatura de descomposición máxima del almidón. Esta grafica también nos indica las temperaturas de inicio de la degradación de la parte orgánica del almidón, estas temperaturas son aproximadamente 212°C y 233°C para el almidón acetilado y nativo respectivamente, esto nos indica que el proceso de acetilación aumentó las susceptibilidad del almidón a la temperatura. Cuando la temperatura alcanza 800°C hay una masa residual del 9,7% y 11% para el almidón nativo y modificado respectivamente.

Analizando los resultados, Rendon et al. [61] investigaron las propiedades térmicas del almidón de plátano nativo y modificado, reportan que en la segunda etapa la pérdida de masa es mayor para el almidón nativo, alrededor de un 53%, mientras que, para los almidones acetilados a diferentes grados de sustitución, la pérdida de masa es menor, entre 44 y 48 %. Por lo cual se concluye que la disminución en la pérdida de masa en los

almidones modificados se debe a que debido a la modificación química disminuye la cantidad de grupos hidroxilos expuestos, por lo cual su estabilidad térmica es menor.

**Figura 3-4:** Termogramas TGA de almidón de bore nativo y modificado.



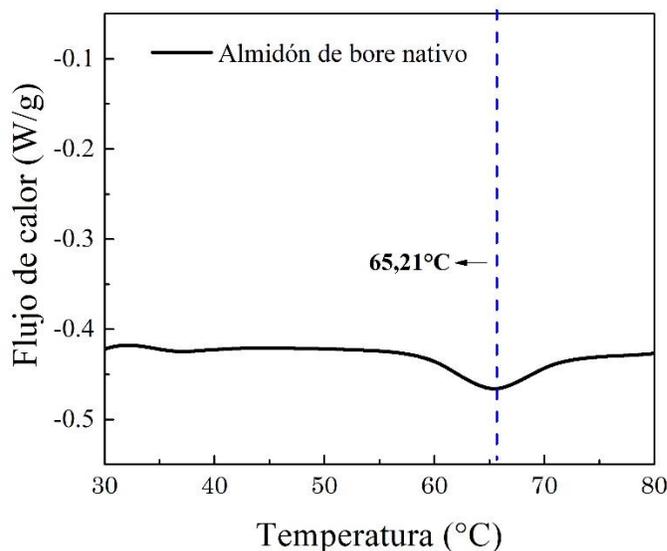
### 3.3.6 Gelatinización del almidón de bore. Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

La aplicación de DSC ha permitido la identificación de estructuras que son consecuencia de las condiciones de procesamiento como las generadas durante la transición vítrea, la gelatinización y la retrogradación del almidón, al igual que las modificaciones térmicas por los tratamientos combinados de calor y humedad, los cuales cambian las propiedades fisicoquímicas del almidón sin destruir su estructura granular [74]. La gelatinización es una de las propiedades más importantes del almidón debido a que esta representa la transición de la estructura semicristalina a una estructura amorfa cuando se somete a un tratamiento térmico, ya que la exposición de este polímero a ciertas temperaturas puede afectar el orden de las cadenas poliméricas del almidón. En la figura 3-5 se muestra el termograma DSC del almidón de bore, en estos se puede observar la temperatura de gelatinización, está representada por un pico endotérmico debido a que es una transición de primer orden, el área bajo la curva representa la entalpia necesaria para que se lleve a cabo la transición. El termograma muestra una temperatura de gelatinización de 65.21°C, donde también se logra evidenciar un proceso endotérmico con una entalpia de 3.057 J/g. De acuerdo con la literatura, el almidón se caracteriza por sus grupos esteres de fosfato, los cuales están unidos por fracciones de amilopectina mediante enlaces covalentes, estos grupos poseen una carga negativa generando una repulsión en el almidón, ocasionando debilitamiento entre la unión de las moléculas, generando mayor enlace con las moléculas de agua, por lo que se requiere menor energía para gelatinizar.

Para establecer una comparación, los resultados de las investigaciones de Lu et al. 2008 [75] sobre almidones de arroz y maíz waxy muestran que las características granulares y su interacción con la amilosa desempeñan un papel importante durante la gelatinización del almidón. Quintero et al. [59] reportan temperaturas de gelatinización para almidones nativos de oreja de elefante, yuca y maíz nativos, de 62,02°C, 62,79°C y 73,07°C respectivamente. Por lo que se puede observar que para almidones que provienen de tubérculos las temperaturas de gelatinización son similares, ya que se encuentran en el rango entre 60-80°C. Otros autores han informado que, a temperaturas más altas, la estructura granular presenta zonas

más ordenadas [76]; esto se debe a que, durante la gelatinización, los gránulos de almidón de acuerdo a su tamaño absorben agua, comienzan a hincharse y aumentan su temperatura, lo que provoca la ruptura parcial de su estructura cristalina; por lo que a medida que la temperatura se acerca al rango de gelatinización específico para cada tipo de almidón, las moléculas de amilosa y amilopectina comienzan a moverse libremente debido al aumento de energía térmica. A medida que los gránulos de almidón se hinchan y las moléculas de amilosa y amilopectina se desplazan, lo que influye en la formación de áreas más ordenadas en la estructura granular del almidón. De acuerdo con los resultados obtenidos por microscopia electrónica de barrido, debido a que el tamaño y la forma del gránulo de almidón pueden influir en la velocidad y la magnitud de la gelatinización, se concluye que el almidón de bore al presentar gránulos más pequeños tiende a gelatinizarse más rápidamente que aquellos almidones que presentan gránulos más grandes. Además, la forma del gránulo también puede afectar cómo se distribuye y expone el almidón al agua durante el proceso de gelatinización.

**Figura 3-5:** Análisis termogravimétrico DSC para el almidón de bore nativo.



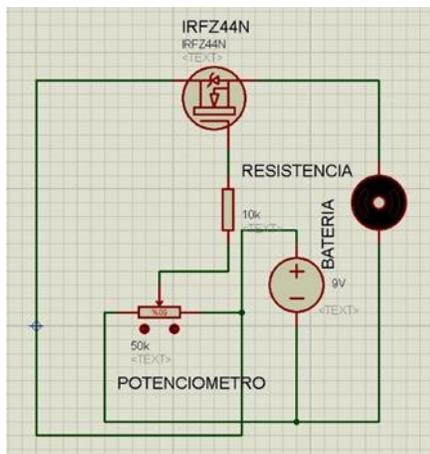
## 3.4 Evaluación del desempeño del prototipo de floculador y filtro

### 3.4.1 Desarrollo del prototipo de coagulador- floculador

El prototipo de coagulador- floculador, se desarrolló a escala, diseñando un circuito eléctrico de tipo DC, el cual integra como elementos eléctricos: IRFZ44N, resistencia de 10K, potenciómetro de 50K, batería de 9V y motor DC a 9V, al cual se le soldó un espiral de alambre galvanizado para realizar el proceso de mezclado. Debido a que los procesos de coagulación y floculación se desarrollan a velocidades diferentes, el control de velocidad del motor para el mezclado se realiza girando la perilla del potenciómetro el cual regula el paso de corriente al motor, y de esta manera se controla el giro de este.

La evaluación y efectividad del sistema de floculación y filtración se llevó a cabo en una de las fuentes de captación de agua de nacimiento de la vereda Sipirra del municipio de Riosucio Caldas. La figura 3-6 muestra el montaje y los materiales utilizados para la puesta a prueba in situ del sistema de tratamiento de aguas.

**Figura 3-6:** Diseño y montaje de prototipo de coagulador-floculador a escala. Sistema de filtración.



Esquema del circuito para el funcionamiento y control de giro del motor



Prototipo de tanque floculador



Capa de carbón activado en polvo dentro del filtro de arcilla



Vista del funcionamiento del sistema de filtración y recolección del agua

Uno de los factores importantes a la hora del desarrollo del prototipo de floculador fue que se logró establecer un sistema de control de velocidad o mezcla para los diferentes procesos a realizar en el tratamiento de aguas, como lo son coagulación (mezcla rápida) y floculación (mezcla lenta) lo cual se puede evidenciar en el siguiente enlace: <https://www.youtube.com/watch?v=9hvO6DCyKNI>

En el video se muestran los pasos consecutivos a partir de la floculación, pero se obvió el uso de floculante, ya que los resultados de los análisis fisicoquímicos y microbiológicos muestran una baja contaminación en este tipo de aguas, por lo cual se obvió el uso de coagulante (sulfato de aluminio), ya que se puede considerar que el agua no tiene una gran cantidad de partículas coloidales disueltas en el agua. El uso de este coagulante podría brindar un mayor efecto y viabilidad al usarse en aguas con elevada contaminación, como aguas residuales.

**Figura 3-7:** Montaje en sitio del sistema de tratamiento de aguas, con floculador a escala y filtro de arcilla y carbón activado.



Floculador, carbón activado y almidón  
modificados utilizados en la aplicación en sitio



Sistema de tratamiento de agua en la fuente  
de captación

Este prototipo muestra buenos resultados y adecuado funcionamiento en los procesos para el cual fue diseñado.



## **4. Conclusiones y recomendaciones**

### **4.1 Conclusiones**

El uso de arcilla y carbón activado en la limpieza de aguas tiene ventajas debido a sus propiedades. La arcilla, por ser porosa, muestra una buena capacidad de adsorción, reduciendo los parámetros fisicoquímicos evaluados en las aguas estudiadas y reteniendo metales pesados y materia orgánica. Sin embargo, no es efectiva para retener virus y bacterias debido a los diferentes tamaños de poro. El carbón activado complementa la acción de la arcilla al eliminar coliformes totales en aguas con poca contaminación microbiológica. En conjunto, estos materiales resultan útiles y efectivos en la purificación de aguas con baja contaminación.

El uso de floculantes como el almidón de bore, resulta ser más útil en el tratamiento de aguas con mayor nivel de contaminación, ya que la acción de este se ve limitada en aguas con baja turbidez debido a que, en aguas más turbias, la concentración de partículas pequeñas es alta, y estas partículas pueden no sedimentar fácilmente por sí solas debido a su pequeño tamaño y carga eléctrica repulsiva. El almidón actúa como un agente aglomerante, permitiendo que estas partículas pequeñas se agrupen en flóculos más grandes que pueden sedimentar más eficientemente; mientras que en aguas con baja turbidez (menor a 10 NTU) como las aguas de nacimiento, el almidón puede contribuir al aumento de la turbidez, debido a que este puede permanecer suspendido en el agua.

Debido a que el tiempo de reacción de la acetilación fue relativamente corto y se produjo un grado de sustitución bajo, se vio limitada la capacidad de floculación del almidón modificado. Solo la parte modificada del almidón pudo reaccionar con el agua y formar flóculos, mientras que los gránulos no modificados quedaron suspendidos, aumentando

levemente la turbidez del agua; por lo cual la cantidad necesaria del floculante depende de las condiciones fisicoquímicas iniciales del agua. Se recomienda usar cantidades menores a 0.4 gramos de almidón por litro de agua en aguas provenientes de nacimientos. El almidón no afecta el pH del agua tratada, ya que este no tiene la capacidad de absorber o liberar iones de hidróxido. En conclusión, el uso adecuado del almidón de bore disminuye significativamente la turbidez, y color del agua.

Se diseñó un prototipo de floculador a escala, replicando una jarra floculadora. Esto permitiría una futura aplicación a nivel hogar o industrial. El prototipo se diseñó por separado del filtro ya que se determinó que, debido al tamaño de los gránulos de almidón, estos tienden a adherirse a las paredes del filtro y el proceso de floculación se vería limitado. El prototipo tiene un control de velocidad para la mezcla rápida y lenta requerida en el proceso de coagulación y floculación. Después de la floculación, el agua tratada se lleva al filtro para su posterior filtración con arcilla y carbón activado.

El objetivo de la investigación era encontrar fuentes sostenibles y no disruptivas para las comunidades locales. Se comprobó que el almidón del bore, una fuente biológica abundante en la zona tiene altos contenidos de almidón. El almidón del bore presenta gránulos más pequeños del orden de nanómetros (600-4000 nm), comparado con fuentes convencionales como papa, yuca y maíz que presentan gránulos más grandes (2-100  $\mu\text{m}$ ), lo que lo convierte en un floculante más eficiente debido a que posee una mayor área de contacto. En conclusión, el uso de este almidón cumple el objetivo de garantizar la seguridad del agua tratada.

En la investigación, se extrajo el almidón del bore mediante métodos físicos, obteniendo un buen rendimiento del biopolímero, determinando que esta planta posee aproximadamente un 86% de almidón /100g, cantidad comparable con el porcentaje de almidón presente en otros tipos de biomasa como papa y yuca (55-90% /100 g). Además, se evidenciaron sus propiedades hidrofóbicas, lo que llevó a realizar una modificación química para mejorar su interacción con el agua fría. La acetilación fue efectiva, mostrando la presencia de grupos acetilo en el almidón modificado, lo que mejora su interacción con el agua.

Finalmente resulta importante resaltar que la combinación del uso de almidón de bore como floculante y del filtro a base de arcilla y carbón activado puede lograr una mayor eficiencia en la purificación del agua. El filtro de arcilla puede eliminar las partículas más grandes que se han formado en el proceso de floculación, por otro lado, el carbón activado puede eliminar aquellos contaminantes principalmente microbiológicos que la arcilla no puede retener. Es importante destacar que, si bien estos métodos son efectivos en la eliminación de ciertos contaminantes, aun no ofrecen una solución integral para todas las formas de contaminación que pueden presentar las aguas, ya que la presencia en altas cantidades de algunos contaminantes, como metales pesados, microorganismos, virus y bacterias pueden requerir métodos adicionales de tratamiento, como la clarificación y desinfección con agentes químicos.

## **4.2 Recomendaciones para trabajos futuros**

Como trabajos futuros se tiene interés particular en estudiar la efectividad de los filtros de arcilla y carbón activado previo tratamiento con almidón como floculante en la limpieza de aguas residuales domesticas para su posible uso agrícola, como alimentación de animales o riego de cultivos.

También se tiene importante curiosidad en estudiar las propiedades del almidón de bore nativo como floculante debido a que este demostró tener gránulos muy pequeños en comparación a otras fuentes, por lo cual se podría estudiar si debido al tamaño granular del almidón se pudiera obviar un proceso de acetilación.

Se recomienda evaluar la efectividad de los procesos realizados en este trabajo en la remoción de contaminantes y metales pesados de aguas residuales industriales, ya que debido a la naturaleza morfológica del almidón este puede ser más útil en la floculación de aguas con mayor contaminación.

Se debe seguir explorando el almidón de bore para conocer más de sus características y potencialidades para plantear otras aplicaciones.

Se recomienda evaluar los posibles impactos ambientales de la utilización a largo plazo de arcilla y carbón activado en la filtración de agua. Esto podría incluir estudios sobre la disposición adecuada de los residuos generados durante el proceso.

Diseño y elaboración de un filtro a base de arcilla y carbón activo usando almidón de bore (alocasia micorriza) como floculante para la purificación de agua de nacimiento proveniente de la vereda Sipirra del municipio de Riosucio Caldas.

---

Investigar la integración de la filtración con arcilla y carbón activado con otras tecnologías de tratamiento de agua, como la desinfección con luz ultravioleta o la ozonización, para lograr un tratamiento más completo y eficiente.

## 5. Anexo. Contenido nutricional del almidón de bore

El almidón en sí mismo es un polisacárido compuesto principalmente de carbohidratos, específicamente de glucosa, el cual también contiene proteínas, grasas y otras sustancias nutritivas aparte de los carbohidratos. El contenido nutricional del almidón se basa generalmente en su composición de carbohidratos, que es su componente principal. En promedio, el almidón suele contener aproximadamente un 70- 80% de carbohidratos dependiendo de su fuente botánica.

En las tablas 5-1 y 5-2 se presentan los resultados de la caracterización química del almidón nativo de bore en base húmeda.

**Tabla 5-1:** Análisis químico del almidón de bore (% en base húmeda).

Análisis Físicoquímico	Resultado propio (%/100g)	Según Referencia [5] (%/100g)
Humedad	8,63	8.11
Materia seca	91,37	-
Nitrógeno total	0,21	-
Proteína total	1,31	11.80
Grasa total	0,49	0.57
Cenizas totales	0,08	2.49
Carbohidratos total	89,49	77.03
Almidón	86,86	-

**Tabla 5-2:** Contenido mineral del almidón de bore medido en mg/100g

Muestra	Magnesio	Hierro	Calcio	Potasio
Almidón de bore	19,23	1,11	118,43	111,08

Las tablas anteriores exponen el análisis químico proximal obtenido para el almidón de bore y su composición de los principales minerales. Los resultados indican que el bore tiene altos contenidos de almidón y carbohidratos, equivalentes al 86,86% y 89,49% respectivamente; además el bajo contenido de nitrógeno y proteína se encuentran

estrechamente relacionados, indicando una alta pureza en el material obtenido. En cuanto al análisis del contenido de minerales (tabla 5-2) de la muestra de almidón de bore, se estudiaron los minerales más comunes en este tipo de muestras, y se observan altas cantidades de magnesio, hierro y calcio las cuales pueden estar atribuidas a las condiciones del suelo donde se encuentran las plantas, ya que si la planta de la cual se extrae el almidón crece en suelos ricos en estos minerales, esta puede absorber pequeñas cantidades de estos, presentado trazas podrían estar presentes en el almidón obtenido. La tabla 5-1 también muestra un comparativo con los datos del estudio de la composición química del almidón de bore obtenido por Arias, 2016 [5]; según estos datos, el autor reporta que su muestra contiene una alta cantidad de proteína y cenizas, las cuales pueden deberse a contaminación durante el proceso de extracción, procesamiento o almacenamiento.

Al analizar y comparar los resultados obtenidos por el análisis proximal para el almidón del tallo de bore con los resultados reportados por Acosta & Blanco 2013 [77], donde para almidones de maíz y yuca, el contenido promedio de proteína fue de 1.23 y 4.26%, el de grasa total 0.75 y 0.12% y el de cenizas fue de 1,24 y 1.84% respectivamente; se observa que el almidón de bore presenta bajos contenidos de proteína en comparación a el contenido proteico que presenta el almidón de yuca; y en cuanto al contenido de grasa no se presentaron diferencias significativas en comparación con los resultados reportados por Acosta & Blanco.

Manrique Quevedo, 2006 [78], reporta el contenido de almidón presente en diferentes tipos de biomasa (tabla 5-3), esta tabla nos indica que fuentes de almidón provenientes de tubérculos como el bore y la yuca pueden tener una mayor cantidad de este biopolímero, ya que los tubérculos tienen más almidón que los cereales y las leguminosas debido a que su función biológica en la planta es la de almacenamiento de energía. Esto les permite acumular una mayor cantidad de almidón en sus células, lo que los convierte en una fuente más concentrada de este polisacárido.

**Tabla 5-3:** Contenido de almidón presente en diferentes tipos de biomasa.

<b>Biomasa</b>	<b>Contenido de almidón (g/100g)</b>	<b>Fuente de biomasa</b>
Tubérculos	55-90	Bore, yuca, papa
Leguminosas	20-45	Frijol
Cereales	35-80	Maíz, trigo

Fuente: Manrique (2006). [78]

Dependiendo de la fuente de almidón, puede haber una pequeña cantidad de fibra dietética asociada con él. La fibra dietética es otra forma de carbohidrato, pero esta no se descompone y absorbe en el cuerpo de la misma manera que el almidón. Fuentes de almidón, como los cereales, las papas, el arroz y las legumbres, también pueden ser una fuente significativa de otros nutrientes esenciales como proteínas, vitaminas y minerales.

Estos resultados muestran que el tallo del bore posee una buena riqueza energética debido al aporte calórico de los carbohidratos, principalmente del almidón, ya que es importante tener en cuenta que el almidón es una fuente de energía importante en la dieta humana, debido a que este descompone en glucosa durante la digestión y proporciona una fuente de energía de liberación sostenida.

Diseño y elaboración de un filtro a base de arcilla y carbón activo usando almidón de bore (alocasia micorriza) como floculante para la purificación de agua de nacimiento proveniente de la vereda Sipirra del municipio de Riosucio Caldas.

---

## 6. Divulgación de los resultados

Durante el desarrollo de esta investigación se está culminando la redacción de un artículo que se espera pueda ser publicado en la revista International Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management el artículo titulado "Bore starch (Alocasia macrorrhiza) as a flocculant in water cleaning."

Adicionalmente se participó en los siguientes congresos:

1. XXX International Materials Research Congress, realizado en el año 2022 en la ciudad de Cancún, México por la sociedad Mexicana de Materiales. El trabajo presentado tenía como título, "Design and elaboration of a filter based on clay and activated carbon using bore starch (alocasia macrorrhiza) as flocculant for water purification."

Diseño y elaboración de un filtro a base de arcilla y carbón activo usando almidón de bore (alocasia micorriza) como floculante para la purificación de agua de nacimiento proveniente de la vereda Sipirra del municipio de Riosucio Caldas.

---



2. XI Congreso Internacional de Materiales realizado en el año 2022 en la ciudad de Santa Marta, Colombia. El trabajo presentado tenía como título, “Extracción, caracterización y modificación del almidón de bore (alocasia macrorrhiza) para su uso como floculante en la limpieza de aguas”.



**El comité organizador del XI Congreso Internacional de Materiales  
XI CIM 2022**

Certifica que el trabajo titulado:

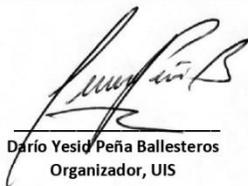
*Extracción, caracterización y modificación del  
almidón de bore (alocasia macrorrhiza) para su uso  
como floculante en la limpieza de aguas.*

Fue presentado por:

Ebelin Daniela Ramirez Hernandez, Posidia Pineda  
Gómez

**En la modalidad de Ponencia Oral**

Santa Marta Colombia, 26-28 octubre, 2022

  
Darío Yesid Peña Ballesteros  
Organizador, UIS

  
Félix Echeverría Echeverría  
Organizador, UdeA

  
Hugo Armando Estupiñán Durán  
Organizador, Director, UNAL











## 7. Bibliografía

- [1] C. Banchón, R. Baquerizo, D. Muñoz, and L. Zambrano, “Coagulación natural para la descontaminación de efluentes industriales,” *Enfoque UTE*, vol. 7, no. 4, pp. 111–126, 2016.
- [2] R. Solís Silvan, J. R. Laines Canepa, and J. R. Hernández Barajas, “Mezclas con potencial coagulante para clarificar aguas superficiales,” *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, vol. 28, no. 3, pp. 229–236, 2012.
- [3] G. S. Simate, S. E. Iyuke, S. Ndlovu, M. Heydenrych, and L. F. Walubita, “Human health effects of residual carbon nanotubes and traditional water treatment chemicals in drinking water,” *Environment International*, vol. 39, no. 1. Elsevier Ltd, pp. 38–49, 2012. doi: 10.1016/j.envint.2011.09.006.
- [4] D. Trujillo, L. F. Duque, J. S. Arcila, A. Rincón, S. Pacheco, and O. F. Herrera, “Remoción de turbiedad en agua de una fuente natural mediante coagulación/floculación usando almidón de plátano,” *Revista Ion*, vol. 27, no. 1, pp. 17–34, 2014.
- [5] M. A. Arias Jara, “Obtención del almidón de la alocaasia macrorrhiza y cuantificación del oxalato de calcio,” Universidad Central de Ecuador, Quito, 2016.
- [6] V. Ortiz Alcocer, G. López Ocaña, C. A. Torres Balcazar, and L. Pampillón González, “Almidón de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) como coadyuvante en la coagulación floculación de aguas residuales domésticas / Cassava Starch (*Manihot esculenta* Crantz) As a coadyuvant in the coagulation flocculation of domestic wastewater,” *CIBA Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, vol. 7, no. 13, pp. 18–46, 2018, doi: 10.23913/ciba.v7i13.73.
- [7] J. E. Chavez, I. Cunaique, and J. Pinco, “Proceso de obtención y evaluación de la eficiencia del almidón del plátano de seda (*Musa acuminata* AAA) para la coagulación – floculación de las aguas superficiales del Río Puchca – Ancash a nivel de laboratorio,” Callao, Peru, 2019.
- [8] S. Diaz Aliaga and V. I. Tafur Izquierdo, “Análisis de la eficiencia de mucilagos y almidones naturales como coagulantes - floculantes en el tratamiento de agua.”

- [9] M. C. Posada-Velez, P. Pineda-Gomez, and H. D. Martinez-Hernandez, "Acetylated corn and potato starches as an alternative to the toxic inorganic coagulants/flocculants for wastewater treatment," *Environ Nanotechnol Monit Manag*, vol. 20, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.enmm.2023.100786.
- [10] N. J. Perales López and M. Barrera-Vargas, "ANÁLISIS ESTRUCTURAL POR DRX DE UNA ARCILLA NATURAL COLOMBIANA MODIFICADA POR PILARIZACIÓN STRUCTURAL ANALYSIS BY DRX OF A MODIFIED COLOMBIAN NATURAL CLAY BY PILLARING," 2013.
- [11] J. Carriazo, R. Molina, and S. Moreno, "Vista de Caracterización de dos arcillas colombianas por difracción de rayos X y su relación con aspectos de origen y transformación," *Boletín de Geología*, vol. 26, 2004.
- [12] S. M. Vidal Henao, "Evaluación de la efectividad del filtro de arcilla y plata coloidal en la potabilización de agua, medida por pruebas fisicoquímicas y microbiológicas," *Repositorio UTP*, p. 76, 2010.
- [13] J. E. Arana Correa, "Evaluación de la aplicación de carbón activado granular en la filtración del agua clarificada del Río Cauca," *Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería de los Recursos Naturales y del Ambiente, Programa Académico de Ingeniería Sanitario y Ambiental, Santiago de Cali*, pp. 1–57, 2016, [Online]. Available: <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/9337/1/3754-0505547.pdf>
- [14] M. Carrión, "EFICIENCIA DEL FILTRO DE ARCILLA PARA LA OBTENCIÓN DE AGUA DE CONSUMO HUMANO," Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Huaraz, Perú, 2021. [Online]. Available: <https://orcid.org/0000-0003-4183-5445>
- [15] D. Infante Chipile, "Carbón activo granular, en la mejora de la calidad del agua potable."
- [16] D. Asmat Campos, E. Bustamante Marrufo, D. Pérez Mauricci, A. Sánchez Gonzales, J. Vásquez Aniceto, and H. Robles Castillo, "Evaluation of the antibacterial potential of micrometric and nanometric silver colloids adhered to clay filters," in *Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology*, Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions, 2020. doi: 10.18687/LACCEI2020.1.1.139.
- [17] C. Rivera López, E. Rodríguez Urrutia, F. Carranza Estrada, and C. Arriaza Alfaro, "Evaluación de los filtros de biocarbón-arcilla en la potabilización de agua de pozo en los municipios de Santiago Nonualco y en san Luis Talpa, departamento de la Paz, El Salvador", [Online]. Available: <https://www.agronomia.ues.edu.sv/agrociencia>

- [18] E. Chávez Chamaya, "Empleo de filtros de carbón activado de endocarpio de coco y cascarilla de arroz para el tratamiento de aguas residuales," Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, Chachapoyas, Perú, 2022. [Online]. Available: <https://orcid.org/0000-0002-9305-7203>
- [19] A. Rivas Hernandez, "Fundamentos de la purificación del agua," in *Ideam*, pp. 82–104.
- [20] A. Barrenechea Martel, "Coagulación," in *Tratamiento de agua para consumo humano Plantas de filtración rápida Manual I: Teoría*, Lima, 2004, pp. 153–244.
- [21] Julen Yanguas Sáenz, "Optimización en el proceso de depuración de aguas residuales urbanas," p. 75, 2016.
- [22] R. E. Olivero, M. Vega, and P. Villegas De Agua, "Opuntia Ficus y Moringa oleífera y sus efectos como clarificantes en aguas turbias," 2020. [Online]. Available: [www.ditar.co](http://www.ditar.co)
- [23] L. S. Abebe, X. Chen, and M. D. Sobsey, "Chitosan coagulation to improve microbial and turbidity removal by ceramic water filtration for household drinking water treatment," *Int J Environ Res Public Health*, vol. 13, no. 3, Jan. 2016, doi: 10.3390/ijerph13030269.
- [24] S. Shamsnejati, N. Chaibakhsh, A. R. Pendashteh, and S. Hayeripour, "Mucilaginous seed of *Ocimum basilicum* as a natural coagulant for textile wastewater treatment," *Ind Crops Prod*, vol. 69, pp. 40–47, Jul. 2015, doi: 10.1016/j.indcrop.2015.01.045.
- [25] M. Morales, "Aplicación de procesos de coagulación floculación en la regeneración de aguas depuradas," Centro Politécnico Superior. Universidad de Zaragoza, 2010.
- [26] M. Bravo, "Coagulantes y floculantes naturales usados en la reducción de turbidez, sólidos suspendidos, colorantes y metales pesados en aguas residuales," Universidad distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, 2017.
- [27] B. García, "Metodología de extracción in situ de coagulantes naturales para la clarificación de agua superficial. aplicación en países en vías de desarrollo," p. 121, 2007.
- [28] F. H. Soriano Ortiz, "Eficiencia del filtro de arcilla en la purificación del agua para consumo humano en Cajamarca," *Universidad Privada del Norte*, pp. 1–134, 2014.
- [29] L. De Vargas, "Tratamiento de agua para consumo humano, plantas de filtración rápida.," in *Tratamiento de agua para consumo humano*, vol. 1, Lima, 2004.

- [30] G. Picasso, M. Del Rosario, and S. Kou, "APLICACIONES TECNOLÓGICAS DE LAS ARCILLAS MODIFICADAS."
- [31] J. Linares, F. Huertas, and J. Capel, "La arcilla como material cerámico. Características y comportamiento."
- [32] D. Aguirre Gaspar, "Evaluación de las características estructurales de la albañilería producida con unidades fabricadas en la región central Junín," *Test*, pp. 1–198, 2004.
- [33] H. H. Murray, "Chapter 2 Structure and Composition of the Clay Minerals and their Physical and Chemical Properties," *Dev Clay Sci*, vol. 2, no. C, pp. 7–31, Jan. 2006, doi: 10.1016/S1572-4352(06)02002-2.
- [34] U. SEVILLA, "Manual Del Carbón Activo," *Aula.Aguapedia.Org*, pp. 1–89, 2011, [Online]. Available: [http://aula.aguapedia.org/pluginfile.php/10339/mod\\_resource/content/1/CARBoN ACTIVO DEFINITIVO tar.pdf](http://aula.aguapedia.org/pluginfile.php/10339/mod_resource/content/1/CARBoN ACTIVO DEFINITIVO tar.pdf)
- [35] D. Mohan and C. U. Pittman, "Arsenic removal from water/wastewater using adsorbents-A critical review," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 142, no. 1–2, pp. 1–53, Apr. 02, 2007. doi: 10.1016/j.jhazmat.2007.01.006.
- [36] O. Ioannidou and A. Zabaniotou, "Agricultural residues as precursors for activated carbon production-A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 11, no. 9, pp. 1966–2005, Dec. 2007. doi: 10.1016/j.rser.2006.03.013.
- [37] W. A. Méndez L and W. Z. La Cruz, "Filtro de arcilla hueco para la purificación del agua (Clay filter hollow cylindrical for water purification)," pp. 1–17, 2017.
- [38] F. E. Mora Parra, "Caracterización del bore (alocasia macrorrhiza) y su utilización como fuente alternativa para la alimentación animal," *Revista de Investigaciones Agroempresariales*, vol. 1, pp. 1–12, 2015.
- [39] D. Bolaños Portilla and C. Montes Rojas, "Evaluación de métodos de propagación de Alocasia macrorrhiza en el municipio de San Pablo Nariño," *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, vol. 14, no. 1, p. 53, 2016.
- [40] G. Basto Gómez, "Caracterización taxonómica y morfológica del bore," Bogotá, 1995.
- [41] D. J. Gonzales Patiño, "Las aráceas una familia sobresaliente en el mundo vegetal," pp. 41–49, 1980.
- [42] J. Hurtado Jiménez, "Estudio del almidón modificado de Banano (*M. sapientum* L.) variedad cavendish obtenido por acetilación," *Revista cubana de Enfermería*, p. 44, 2019.

- [43] P. Villarroel, C. Gómez, C. Vera, and J. Torres, "Resistant starch: Technological characteristics and physiological interests," *Revista Chilena de Nutricion*, vol. 45, no. 3, pp. 271–278, Sep. 2018, doi: 10.4067/s0717-75182018000400271.
- [44] M. V. Tupa Valencia, "Desarrollo de una metodología sostenible de síntesis de almidones acetilados," Instituto de Tecnología en Polímeros y Nanotecnología (ITPN) CONICET-UBA, Buenos Aires, 2015.
- [45] P. Pineda Gómez, "Efecto de la difusión de calcio en las transformaciones fisicoquímicas en biopolímeros derivados del maíz, sometidos a tratamientos térmicos alcalinos," Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, 2012.
- [46] M. A. Vega, "Diseño de un proceso piloto para la fabricación de termoplásticos a partir de almidones," Universidad central de Ecuador, Quito, 2020.
- [47] D. E. Servicios and D. E. L. A. Fao, "Guía técnica para producción y análisis de almidón de yuca"
- [48] C. Granados, L. Guzmán, D. Acevedo, M. Díaz, and A. Herrera, "Propiedades funcionales del almidón de Sagú ( *Maranta arundinacea* )," vol. 12, no. 2, pp. 90–96, 2014.
- [49] F. Han, M. Liu, H. Gong, S. Lü, B. Ni, and B. Zhang, "Synthesis, characterization and functional properties of low substituted acetylated corn starch," *Int J Biol Macromol*, vol. 50, no. 4, pp. 1026–1034, May 2012, doi: 10.1016/J.IJBIOMAC.2012.02.030.
- [50] M. Rivas González, P. B. Zamudio Flores, and L. A. Bello Pérez, "Efecto del grado de acetilación en las características morfológicas y fisicoquímicas del almidón de plátano," *Rev Mex Ing Quim*, vol. 8, no. 3, pp. 291–297, 2009, [Online]. Available: [www.amidiq.org](http://www.amidiq.org)
- [51] J. Prieto Méndez, C. L. Trejo Cárdenas, F. Prieto García, M. A. Méndez Marzo, L. A. Bello Pérez, and A. D. Román Gutiérrez, "Acetilación y caracterización del almidón de cebada," 2010.
- [52] J. Prieto Méndez, C. L. Trejo Cárdenas, F. Prieto García, M. A. Méndez Marzo, L. A. Bello Pérez, and A. D. Román Gutiérrez, "Acetilación y caracterización del almidón de cebada," *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, vol. 6, no. 1, pp. 32–43, 2010.
- [53] M. V. Tupa Valencia, "Modificación organocatalítica de almidón para la obtención sostenible de derivados de alto valor agregado," Buenos Aires, Mar. 2019.

- [54] J. A. Villena Chávez, "Water quality and sustainable development," *Rev Peru Med Exp Salud Publica*, vol. 35, no. 2, pp. 304–308, Apr. 2018, doi: 10.17843/rpmesp.2018.352.3719.
- [55] P. Pineda Gómez, N. C. Angel Gil, C. Valencia Muñoz, A. Rosales Rivera, and M. E. Rodríguez García, "Thermal degradation of starch sources: Green banana, potato, cassava, and corn - Kinetic study by non-isothermal procedures," *Starch/Staerke*, vol. 66, no. 7–8, pp. 691–699, 2014.
- [56] A. Sulbarán, G. E. Matiz, and Y. Baena, "Acetilación del almidón de millo (*Pennisetum glaucum*) y evaluación de su aplicación como posible excipiente.," vol. 47, no. 2, pp. 255–276, 2018.
- [57] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, *RESOLUCIÓN 631 DE 2015*. Colombia.
- [58] N. Mutis, "Estudio de las modificaciones fisicoquímicas originadas por la inclusión de minerales en la matriz del almidón de papa y plátano," 2019, [Online]. Available: <http://bdigital.unal.edu.co/73528/2/1053828112.2019.pdf>
- [59] J. A. Quintero, J. A. Dávila, J. Moncada, O. H. Giraldo, and C. A. Cardona, "Análisis y caracterización de materiales amiláceos y celulósicos después de modificación enzimática," *DYNA (Colombia)*, vol. 83, no. 197, pp. 44–51, Jun. 2016, doi: 10.15446/dyna.v83n197.42729.
- [60] S. M. Londoño Restrepo *et al.*, "Physicochemical, morphological, and rheological characterization of *Xanthosoma robustum* Lego-like starch," *Int J Biol Macromol*, vol. 65, pp. 222–228, 2014, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2014.01.035.
- [61] R. Rendon Villalobos, E. García Hernandez, M. Guizado Rodríguez, R. Salgado Delgado, and N. Rangel Vázquez, "Obtención y caracterización de almidón de plátano (*Musa paradisiaca* L.) acetilado a diferentes grados de sustitución," *Afinidad: Revista de química teórica y aplicada*, vol. 67, pp. 294–300, 2010.
- [62] V. D. Quintero Castaño, J. C. Lucas Aguirre, and E. N. Álzate Carvajal, "Determinación de las propiedades térmicas y composicionales de la harina y almidón de chachafruto," *Ingenium: Revista de la facultad de ingeniería*, vol. 28, pp. 16–32, 2013.
- [63] O. Paredes Lopez, M. Schevenin, D. Hernandez Lopez, and A. Cárabez Trejo, "Amaranth Starch -Isolation and Partial Characterization," *Starch/Starke*, pp. 205–207, 1989.
- [64] J. F. Mano, D. Koniarova, and R. L. Reis, "Thermal properties of thermoplastic starch/ synthetic polymer blends with potential biomedical applicability," *J Mater Sci Mater Med*, vol. 14, pp. 127–135, 2003.

- [65] J. M. Fang, P. A. Fowler, C. Sayers, and P. A. Williams, "The chemical modification of a range of starches under aqueous reaction conditions," *Carbohydr Polym*, vol. 55, no. 3, pp. 283–289, Feb. 2004, doi: 10.1016/J.CARBPOL.2003.10.003.
- [66] S. M. Londoño Restrepo, R. Jeronimo Cruz, B. M. Millán Malo, E. M. Rivera Muñoz, and M. E. Rodríguez García, "Effect of the Nano Crystal Size on the X-ray Diffraction Patterns of Biogenic Hydroxyapatite from Human, Bovine, and Porcine Bones," *Sci Rep*, vol. 9, no. 1, Dec. 2019, doi: 10.1038/s41598-019-42269-9.
- [67] P. Laven, "Separating diffraction from scattering: the million-dollar challenge," *J Nanophotonics*, vol. 4, no. 1, p. 041593, Mar. 2010, doi: 10.1117/1.3374327.
- [68] M. Salcedo, J. Rodríguez, and M. Figueroa, "Efecto de la acetilación en las propiedades funcionales de almidones de yuca," *Rev Mex Ing Quim*, vol. 15, no. 3, pp. 787–796, 2016, [Online]. Available: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62048168010>
- [69] Y. Xu, V. Miladinov, and M. A. Hanna, "Synthesis and characterization of starch acetates with high substitution," *Cereal Chem*, vol. 81, no. 6, pp. 735–740, 2004, doi: 10.1094/CCHEM.2004.81.6.735.
- [70] A. Ceballos, "Estudio comparativo de tres sistemas de secado para la producción de un polvo deshidratado de fruta," Universidad Nacional de Colombia, Manizales, 2008.
- [71] L. Molina *et al.*, "PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS, FUNCIONALES Y ESTRUCTURALES DE ALMIDONES NATIVOS Y ACETILADOS OBTENIDOS A PARTIR DE LA PAPA (*Solanum tuberosum*) var. 'ÚNICA,'" 2019.
- [72] S. Pohja, E. Suihko, M. Vidgren, P. Paronen, and J. Ketolainen, "Starch acetate as a tablet matrix for sustained drug release," *Journal of Controlled Release*, vol. 94, no. 2–3, pp. 293–302, Feb. 2004, doi: 10.1016/j.jconrel.2003.09.017.
- [73] N. Singh Sodhi and N. Singh, "Characteristics of acetylated starches prepared using starches separated from different rice cultivars," *J Food Eng*, vol. 70, no. 1, pp. 117–127, Sep. 2005, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2004.09.018.
- [74] A. Sandoval Aldana, E. Rodríguez Sandoval, and A. Fernández Quintero, "Aplicación del análisis por calorimetría diferencial de barrido (DSC) para la caracterización de las modificaciones del almidón," 2005.
- [75] T. J. Lu, C. S. Duh, J. H. Lin, and Y. H. Chang, "Effect of granular characteristics on the viscoelastic properties of composites of amylose and waxy starches," *Food Hydrocoll*, vol. 22, no. 1, pp. 164–173, Jan. 2008, doi: 10.1016/J.FOODHYD.2007.04.001.

- [76] X. Qi, R. F. Tester, C. E. Snape, V. Yuryev, L. A. Wasserman, and R. Ansell, "Molecular basis of the gelatinisation and swelling characteristics of waxy barley starches grown in the same location during the same season. Part II. Crystallinity and gelatinisation characteristics," *J Cereal Sci*, vol. 39, no. 1, pp. 57–66, Jan. 2004, doi: 10.1016/S0733-5210(03)00066-3.
- [77] A. P. Acosta and C. Blanco, "Obtención y caracterización de almidones nativos colombianos para su evaluación como posibles alternativas en la industria alimentaria," 2013.
- [78] N. Manrique Quevedo, "Producción de almidones pregelatinizados a partir de mezclas de almidones de fuentes no convencionales usando un extrusor de doble tornillo," 2006.