

**ADSORCIÓN DE MAGNESIO Y FÓSFORO EN RESIDUO DEL
PROCESAMIENTO DEL FIQUE**

JAVIER HERNANDO FULI ARCOS



**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
POPAYÁN
2024**

**ADSORCIÓN DE MAGNESIO Y FÓSFORO EN RESIDUO DEL
PROCESAMIENTO DEL FIQUE**

JAVIER HERNANDO FULI ARCOS

**Proyecto de Trabajo de Grado en Modalidad de Investigación
Requisito Para Optar el Título de Químico**

DIRECTOR

**EDIER HUMBERTO PEREZ Ph. D.
DIRECTOR GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN AGROQUÍMICA**

ASESOR

JAIME ANDRES PARRA REYES M.Sc.

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
POPAYÁN
2024**

Nota de Aceptación

Director _____
EDIER HUMBERTO PEREZ Ph. D.

Asesor _____
JAIME ANDRES PARRA REYES M. Sc.

Jurado _____
Dr. FERNANDO JOSE HERNANDEZ BLANCO

Jurado _____
Dr. EMERSON ALONSO RENGIFO CARPINTERO

Popayán, Abril 2024

Dedicatoria

Este momento tan especial para mí y mi familia, primero se lo quiero dedicar a Dios y la Santísima Virgen que sin ellos en nuestras vidas sería algo impensable que pudiéramos culminar nuestros objetivos y metas propuestas, seguidamente, a mis padres, JESUS HERNANDO FULI FLORES (Q.E.P.D.) y BERENICE ARCOS LAME por su amor incondicional, apoyo, y consejos que me dieron pude culminar esta meta tan importante, a mi hermana ANA CAROLINA FULI ARCOS que es el regalo más puro y bonito que me dejó mi padre, al padre JAIRO ARCOS LAME que se convirtió en ese sustento y pilar fundamental después de la partida de mi padre, el cual se convirtió en más que mi tío en ese amigo que me aconsejó y me dio fortaleza para culminar y con el cual podré contar siempre, a ese angelito MIGUEL ANGEL BEDOYA FULI que llegó para llenar ese vacío que dejaba un ser tan importante en nuestras vidas y convertirse en ese motorcito de lucha y perseverancia. A toda mi familia que siempre estuvieron en esos momentos donde se hizo necesaria su presencia y así culminar esta etapa de mi vida.

También a todos esos compañeros que durante esta carrera estuvieron a mi lado en este proceso nombrarlos sería una lista grande, pero de corazón les agradezco por todo ese tiempo en la carrera.

Agradecimientos

A la universidad del Cauca, al departamento de Química y a todos sus profesores que durante este tiempo me ayudaron a formarme académicamente y como persona.

Al grupo de investigación de Agroquímica por acogerme y darme la oportunidad, al profesor Edier Humberto Pérez por ser mi director y ayudar en este proyecto sus consejos y ánimos de culminar, a Jaime Andrés Parra por su ayuda y su coodirección sin esa ayuda habría sido más complejo este momento.

A la unidad de análisis de la Universidad del Cauca y al laboratorio del SENA por permitirme realizar las investigaciones pertinentes para la culminación de esta investigación.

Y por último de nuevo a todos esos compañeros que la carrera me permitió conocer tantos momentos que pasamos, muchas, pero muchas gracias por sus amistades que aún conservo.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	12
1. INTRODUCCIÓN.....	13
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	15
3. OBJETIVOS.....	17
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	17
3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	17
4. MARCO TEÓRICO.....	18
4.1. Residuos orgánicos.....	18
4.1.1. Residuos Agroindustriales.....	18
4.2. Funciones de los elementos minerales.....	18
4.2.1. Magnesio.....	19
4.2.2. Fósforo.....	19
4.3. Fibras.....	20
4.3.1. Clasificación de las fibras.....	21
4.3.2. Composición de la fibra.....	21
4.4. Fique.....	24
4.5. Tratamientos de las fibras.....	24
4.5.1. Tratamiento químico.....	25
4.6. Fenómenos de Adsorción.....	25
4.6.1. Fenómenos de adsorción.....	26
4.6.2. Factores que influyen en procesos de adsorción.....	27
4.6.3. Bioadsorción.....	29
4.6.4. Cinética de adsorción.....	29
4.6.5. Estudio de equilibrio.....	30
4.7. Diseños experimentales.....	32
4.7.1. Diseño Plackett-Burman.....	32
4.7.2. Diseño Box-Behnken.....	32
4.8. Calidad de media analítica.....	33

4.8.1. Incertidumbre.....	33
5. METODOLOGÍA.....	34
5.1. Reactivos	34
5.2. Preparación del aserrín de fique	34
5.3. Caracterización fisicoquímica del residuo agroindustrial.....	34
5.3.1. Determinación de Humedad.....	35
5.3.2. Cenizas	35
5.3.3. Determinación de C_{org} ; S y N	36
5.3.4. Espectroscopia infrarroja IR	36
5.3.5. Microscopía de Barrido Electrónico (SEM).....	36
5.3.6. Extracción de Celulosa y Lignina	36
5.4. Determinación Magnesio	37
5.4.1. Preparación curva calibración	38
5.2. Determinación Fósforo	38
5.3. Procesos de Adsorción de Mg^{2+}	39
5.3.1. Determinación del tiempo de equilibrio	39
5.3.2. Capacidad de adsorción.....	39
5.3.3. Isoterma de adsorción.....	39
5.3.4. Cinética de la reacción	39
5.4. Modificación fibra de fique	40
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	41
6.1. Caracterización del residuo agroindustrial (Humedad, Cenizas, C_{org} , Mg, P, IR, SEM, Celulosa y Lignina).....	41
6.2. Diseños Experimentales	45
6.2.1. Plackett-Burman	45
6.2.2. Box-Behnken.....	49
6.3. Evaluación adsorción Mg^{2+}	53
6.3.1. Evaluación adsorción tiempo de equilibrio	53
6.3.2. Evaluación capacidad de adsorción.....	53
6.3.3. Modelos adsorción	55
6.3.4. Cinética adsorción.....	57

6.3.5. Evaluación adsorción Mg^{2+} y HPO_4^{2-} en el aserrín de fique.....	58
6.4 Modificación del aserrín de fique	59
7. CONCLUSIONES.....	60
8. RECOMENDACIONES.....	61
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1 Variables para evaluar la adsorción Mg^{2+}	32
Tabla 2 Rampa temperatura determinación de cenizas.....	35
Tabla 3 Parámetros equipos adsorción atómica.....	37
Tabla 4 Variables adsorción diseño Plackett-Burman.....	38
Tabla 5 Curva calibración, cuantificación Mg^{2+}	38
Tabla 6 Caracterización residuo fique	41
Tabla 7 Porcentajes Humedad diferentes fibras vegetales	42
Tabla 8 Composición química de <i>Furcraea</i> sp y otras fibras naturales	42
Tabla 9 Grupos funcionales encontrados en la fibra <i>Furcraea</i> sp.	43
Tabla 10 Diseño experimental Plackett-Burman.....	46
Tabla 11 Análisis varianza diseño Plackett-Burman	48
Tabla 12 Interacciones optimización Box-Behnken	49
Tabla 13 Diseño Box-Behnken	49
Tabla 14 Capacidad de adsorción del aserrín de fique a diferentes concentraciones de Mg^{2+}	54
Tabla 15 Constantes de los modelos empleados para modelar la isoterma de biosorción de Mg^{2+}	56
Tabla 16 Constantes de los modelos empleados para modelar el modelo cinético de la biosorción de Mg^{2+}	58
Tabla 17 Porcentajes de adsorción de Mg^{2+} y HPO_4^{2-} en el aserrín de fique	58
Tabla 18 Porcentajes de adsorción Mg^{2+} y HPO_4^{2-} en el aserrín de fique modificado	59

LISTADO DE GRAFICAS

Figura 1 Estructura de una fibra vegetal	20
Figura 2 Estructura de la celulosa	22
Figura 3 Estructura de la lignina.....	23
Figura 4 Componentes de la lignina.....	23
Figura 5 Fenómeno de adsorción	26
Figura 6 Espectro IR de la fibra <i>Furcraea</i> sp.....	43
Figura 7 Micrografía SEM <i>Furcraea</i> sp	45
Figura 8 Micrografía SEM <i>Furcraea</i> ssp.....	45
Figura 9 Prueba de normalidad Plackett-Burman.....	47
Figura 10 Diagrama Pareto diseño Plackett-Burman adsorción Mg^{2+}	48
Figura 11 Diagrama prueba de Normalidad Shapiro-Wilk	51
Figura 12 Diagrama Pareto Box-Behnken.....	52
Figura 13 Gráfico superficie de respuesta.....	52
Figura 14 Adsorción Mg^{2+} en fibra de fique a través del tiempo	53
Figura 15 Capacidad de adsorción del aserrín de fique a diferentes concentraciones	55
Figura 16 Isotherma de biosorción de Mg^{2+}	56
Figura 17 Cinética del proceso de biosorción de Mg^{2+}	57

LISTA DE ACRONIMOS

- (C₆H₈O₆): Ácido ascórbico
(HNO₃): Ácido Nítrico
(HClO₄): Ácido Perclórico
(H₂SO₄): Ácido Sulfúrico
(Ca): Calcio
(MgCl₂ 6 H₂O): Cloruro de Magnesio Hexahidratado
(P): Fósforo
(HPO₄²⁻): Fosfatos
(K₂HPO₄): Fosfato de Potasio dibásico
(NaOH): Hidróxido de sodio
(Mg): Magnesio
((NH₄)₆ Mo₇O₂₄ 4 H₂O): Molibdato de Amonio tetrahidratado
(N): Nitrógeno
(K): Potasio
(K(SbO)C₄H₄O₆ 0,5 H₂O): Tartrato de Antimonio y Potasio Hemihidratado

RESUMEN

Con el incremento de la población mundial año tras años los desechos agroindustriales también han aumentado considerablemente, generando daños ambientales y sanitarios por su desuso. Una de las alternativas más prometedoras es el emplear los desechos agroindustriales como potenciales abonos agrícolas ricos en nutrientes de baja adsorción y poca disponibilidad para las plantas, como el magnesio y el fósforo. Es por ello que se empleó el residuo agroindustrial de fique (*Furcraea sp.*) para la adsorción de estos nutrientes, empleando un diseño experimental Plackett-Burman para evaluar las variables más significativas en este proceso de adsorción, encontrando que el tamaño de partícula, el tiempo y la cantidad de adsorbente fueron las variables más significativas en este proceso, optimizando estos factores mediante un diseño de superficie de respuesta Box-Behnken, donde se encontró que las condiciones más óptimas para una mayor adsorción de Mg^{2+} fueron de 1,0303 g de adsorbente con un tamaño de partícula de 1000 μm durante 57 minutos.

Se realizaron experimentos para evaluar el modelo de isoterma de adsorción que representa mejor este fenómeno considerando las ecuaciones matemáticas de Langmuir y Freundlich que describen los modelos de adsorción, la evaluación de los r^2 en ambos modelos fue iguales, aunque la capacidad máxima de adsorción (q_{max}) lo representa el modelo de Freundlich con un valor de $q_{max}=5,01$ mg/g. Mientras que para la cinética el modelo de pseudo segundo orden es el que mejor se ajusta a los resultados experimentales.

Los resultados obtenidos muestran porcentajes de adsorción de Mg^{2+} de $54,8\pm 2,6$, una vez la fibra adsorbida con Mg^{2+} se sometió a un segundo proceso de adsorción con HPO_4^{2-} se evidenciaron porcentajes de adsorción de 0, 4 y 8% de P. por otro lado, la fibra fue modificada con una solución al 6% p/v de NaOH y se sometió a procesos de adsorción de Mg^{2+} obteniendo una adsorción de $84,2\pm 13,2$ que al ser posteriormente sometidos a procesos de adsorción de HPO_4^{2-} no se registró un valor cuantificable de este nutriente.

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas la comunidad científica ha puesto en conocimiento y llamado la atención a la sociedad, en la necesidad de proteger la atmósfera, la biodiversidad, con el fin de mejorar los servicios ecosistémicos que nos presta, la sustentabilidad y la calidad de los productos ecológicos (Karimah et al., 2021), así como disminuir la dependencia de productos no renovables; las investigaciones se han centrado en la búsqueda de compuestos a base de fibras naturales, por ser renovables y biodegradables (Estrada et al., 2021) proponiendo por su uso dado su comportamiento ecológico que genera ventajas durante la aplicación e implementación y también al final de su vida útil sin mayores efectos adversos (Operato et al., 2023; Sharma et al., 2020).

El uso de residuos lignocelulósicos ayuda a mitigar problemas de contaminación generados por desechos, vertederos, gases tóxicos y emisiones de gases de efecto invernadero. Muchos estudios han demostrado que los biofertilizantes a base de fibras naturales no representan ningún peligro para la salud humana o medio ambiente (Cao et al., 2023; Mngomezulu et al., 2014), sumado al hecho de que estos materiales se pueden obtener de varias partes de la planta, tienen ventajas en su capacidad de renovación y costo de adquisición relativamente bajo que satisfacen las demandas actuales de reducir costos de implementación y generación de productos eco sostenibles (Salasinska et al., 2016). También tienen buenas propiedades mecánicas por lo que se utilizan en diversas aplicaciones como: paneles interiores de automóviles y aeronaves, juguetes y carcasas para dispositivos electrónicos como portátiles y celulares (Estrada et al., 2021).

Algunos investigadores abogan por el uso de fertilizantes alternativos como el estiércol de vaca y biofertilizantes (Pacheco et al., 2017), debido a que la mayoría de los agroquímicos convencionales, incluidos los fertilizantes, no llegan al lugar deseado y se pierden a través de diferentes procesos ambientales como la escorrentía superficial, la volatilización, la lixiviación, las corrientes de aire, entre otras (Chakraborty et al., 2023). Las plantas en general necesitan de 16 nutrientes esenciales, 13 de los cuales provienen del suelo y aunque se ha logrado obtener diversas variedades de plantas que son resistentes a insectos y patógenos, presentan deficiencia de nutrientes como N, P, K y Ca (Chen et al., 2018).

Teniendo en cuenta los problemas de deficiencias presentados en adsorción de algunos nutrientes por las plantas para su crecimiento y demás funciones vitales, y como base el aprovechamiento de residuos agroindustriales, esta investigación opta

por el uso de una fibra natural resultante de procesos industriales como el aserrín de fique, para la adsorción de nutrientes como Mg^{2+} y HPO_4^{2-} , con el fin de usarse como posible enmienda en cultivos donde se presenta alta deficiencia de estos nutrientes.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Investigaciones recientes sugieren que la población de seres humanos en la tierra podría alcanzar los 10 mil millones para el 2050, siendo la agricultura la principal forma de satisfacer la creciente demanda alimenticia (C. Wang et al., 2022), la cual ha estado a la vanguardia de avances tecnológicos que subrayan la importancia en la producción de cultivos como fuente primaria de alimentos para así satisfacer el hambre (Vejan et al., 2021). Por este motivo se requieren grandes cantidades de productos agroquímicos y fertilizantes, para cumplir con la calidad nutricional requerida de producción de alimentos y mantener la fertilidad del suelo (Chakraborty et al., 2023). En el periodo comprendido entre el 2018 y 2019, el consumo mundial de fertilizantes fue de 188 millones de toneladas, el cual alcanzara los 203 millones de toneladas para el año 2023 (Duan et al., 2023).

Los fertilizantes químicos se han empleado para aumentar el rendimiento de los cultivos en aproximadamente un 50% y mejorar la fertilidad del suelo. Sin embargo, el uso de estos materiales es nocivo para el medio ambiente (Khan et al., 2021; C. Wang et al., 2022) debido a que la aplicación excesiva de estos productos deteriora significativamente la calidad de las tierras agrícolas por la salinización, agotamiento de la materia orgánica, lixiviación excesiva de nutrientes y daños en el suelo (Cao et al., 2023; Duan et al., 2023).

Dentro de los elementos esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas se encuentra el fósforo (P), donde su disponibilidad depende de la abundancia de minerales presentes, la adición de fertilizantes, el aporte de residuos orgánicos, la actividad microbiana a través de mineralización e inmovilización, procesos de disolución, adsorción y precipitación (Díaz & Sadeghian, 2018), pero la mayor parte de este elemento se adsorbe de hidróxidos metálicos y se precipita como fosfato de calcio o se une a la materia orgánica (Li et al., 2022), dejándolo no disponible para la planta. La roca fosfórica es un recurso de fosfato no renovable que se prevé se agote entre 50 y 100 años, por lo que es necesario encontrar nuevos procesos alternativos para satisfacer la demanda de este elemento y maximizar el crecimiento de las plantas (Cedeño Zambrano et al., 2021; G. Wang et al., 2022). Estas observaciones sugieren que mejorar la eficiencia de los fertilizantes fosfatados es una prioridad principal para el desarrollo de una agricultura sostenible (Yang et al., 2023). Otro elemento esencial para las plantas es el Magnesio (Mg), más del 90% del magnesio total en el suelo está en una forma no disponible para las plantas y por lo tanto se incorpora a la estructura cristalina del mineral del suelo (Cedeño Zambrano et al., 2021).

En la actualidad, las fibras naturales han recibido una atención considerable debido a sus propiedades colectivas únicas, que incluyen baja densidad, peso ligero, bajo costo, fácil disponibilidad, reciclabilidad y respeto al medio ambiente. En Colombia, unos de los productos más visibles en el territorio es la planta *Furcraea sp.*, de la cual se extrae la fibra natural conocida como cabuya, sin embargo, solo se utiliza el 4% del peso total de las hojas en el proceso de extracción de la fibra, quedando el 96% restante, tradicionalmente conocido como “bagazo”, como residuo y generando un impacto negativo en el medio ambiente, contaminando el agua a través del proceso de lavado.

Es por este motivo que se propone el uso de los residuos agroindustriales enriquecidos con Mg y P, y registrar evidencia que permita en un futuro próximo proponer este material como posible abono agrícola modificable que libere Mg y P mejorando la disponibilidad de estos nutrientes a la planta cultivada.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la adsorción de Magnesio y Fósforo en residuos agroindustrial de fique (*Furcraea sp.*), como un posible uso de enmienda en suelo.

3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Realizar pruebas para la caracterización usando FTIR, SEM y parámetros físicos y químicos del residuo de fique (*Furcraea sp.*).
- Evaluar los parámetros óptimos para la adsorción de Magnesio y Fósforo en el residuo de fique (*Furcraea sp.*).
- Cuantificar las cantidades de Mg y P adsorbidas en el aserrín de fique mediante las técnicas de Absorción Atómica y espectrofotometría de UV-Vis.

4. MARCO TEÓRICO

4.1. Residuos orgánicos

Los residuos generados de las actividades domésticas, comerciales o industriales son denominados desechos o basuras que pueden ser utilizados para producir subproductos, los cuales pueden ser sólidos, líquidos o gaseosos, estos pueden ser de origen animal o vegetal. Por ello es necesario combinar procesos de reciclaje y conversión para mitigar la contaminación utilizando la misma actividad agrícola que las generen (Álvarez-palomino et al., 2018).

4.1.1. Residuos Agroindustriales

Los residuos o subproductos se generan en cualquier proceso de producción y normalmente no se vuelven a utilizar como materia prima en la cadena de producción. El sector agroindustrial de la fibra de fique no es una excepción, ya que del total de la hoja solo se usa el 4% obtenido del consumo directo de productos primarios o de su industrialización, y el 96% restante ya no son útiles para los procesos que los produjeron, generando un impacto negativo en el ambiente. En la mayoría de los casos los residuos agroindustriales tienen propiedades óptimas y pueden ser utilizados en otra cadena productiva o como alternativa de tratamiento o restauración de ambiente contaminados.

Las propiedades o composición química y biológica de los residuos agroindustriales dependen del proceso de transformación y de las materias primas utilizadas. Los residuos agroindustriales de fique son materiales lignocelulósicos, es decir, los contenidos de celulosa, hemicelulosa y lignina representan sus mayores porcentajes de composición. Estos residuos tienen el potencial de ser aprovechados en beneficio ambiental y social cuando se reciclan y se utilizan para prevenir la contaminación o restaurar ecosistemas alterados. La diversidad de residuos agroindustriales puede ser utilizada principalmente como sustituto para la producción de compost, bioenergía u otros productos de interés con valor agregado (Vargas Corredor & Pérez Pérez, 2018).

4.2. Funciones de los elementos minerales

Todos los cultivos requieren la cantidad adecuada de nutrientes para que las plantas puedan crecer, funcionar correctamente y que estos se pueden obtener, las plantas los pueden obtener de forma natural del suelo o mediante la fertilización realizadas por los agricultores. Una dieta mineral equilibrada es fundamental para una buena producción, por lo que es importante evaluar periódicamente cada nutriente y su

función reguladora, así como descartar deficiencias en uso en un programa de fertilización.

4.2.1. Magnesio

En el suelo el magnesio proviene de la meteorización de los minerales que lo contienen en su estructura como la dolomita y calcita. El magnesio existente en forma de biotita y clorita. Cuando estos minerales se meteorizan (descomposición química y degradación física), se libera Mg^{2+} para que pueda ser absorbido por las plantas y otros organismos, pero se pierde por lavados, absorbido por la carga negativa de la parte coloidal del suelo o precipitado como mineral secundario, impidiendo su disponibilidad para las plantas.

El magnesio es un macroelemento menor esencial para el desarrollo de las plantas y, junto con el potasio, tiene principalmente una función metabólica y estructural. Además, el magnesio es el único componente mineral de la molécula de clorofila, por lo que la falta de magnesio supone su deficiencia y una reducción del proceso fotosintético (Carrillo de Cori et al., 2014).

4.2.2. Fósforo

En los últimos años, la importancia del fósforo (P) ha llamado la atención sobre su uso eficiente en la agricultura por tres razones principales. En primer lugar, la roca fosfórica, utilizada para fabricar fertilizantes fosfatados, es un recurso finito no renovable que debe utilizarse de manera eficiente para maximizar su vida útil. En segundo lugar, es necesario mantener y mejorar el contenido de fósforo de muchos suelos, especialmente en los países menos desarrollados, para el crecimiento de plantas alimenticias en los países menos desarrollados, para el crecimiento de plantas alimenticias, fibras y cultivos bioenergéticos. En tercer lugar, un factor determinante e importante de los efectos adversos de la eutrofización en la masa de agua superficial por la transferencia de fósforo de los suelos a las masas de agua (Johnston et al., 2014)

El P juega un papel integral en la fertilidad del suelo y la productividad de los cultivos. Sin embargo, debido a la reactividad del fósforo, la no disponibilidad en los fertilizantes fosfatados aplicados puede limitar fácilmente la absorción por parte de las plantas debido a los procesos de adsorción o fijación microbiana. En la disponibilidad de P en los suelos aumenta la necesidad de fertilizar repetidas veces con este nutriente para cumplir con los requisitos del cultivo. Por otro lado, la

aplicación intensiva y el exceso de fosforo en las tierras cultivadas conducen a la eutrofización de los cuerpos de agua receptores a través de la lixiviación y la escorrentía. Lo anterior genera la necesidad urgente de aplicar nuevos métodos de manejo desde la perspectiva de reducir la cantidad de aplicación de fertilizantes fosforados o mejorar su eficiencia del uso (Ghodsad et al., 2022).

4.3. Fibras

Las fibras naturales se subdividen según su origen (vegetal, animal o mineral) estas pueden provenir de varias fuentes como: de las plantas se pueden obtener el lino, cáñamo, yute y algodón, de fuentes animales se obtienen la lana y la seda. Las fibras naturales vegetales se pueden considerar como materiales compuestos principalmente por fibrillas de celulosa incrustadas en una matriz de lignina. Las fibrillas de celulosa se alinean a lo largo de las fibras, proporcionando la máxima resistencia a la tracción y la flexión, así como la rigidez. Los principales componentes de las fibras naturales son la celulosa (α -celulosa), la hemicelulosa, la lignina, la pectina y las ceras (John & Thomas, 2008).

Las paredes de las fibras están compuestas por microfibrillas de las cadenas de celulosa que refuerzan la lignina y la hemicelulosa en la matriz. Las microfibrillas se enrollan helicoidalmente a lo largo del eje de la fibra hueca, lo que proporciona resistencia porque se requiere una gran cantidad de energía para desenredar estas fibrillas orientadas. Las fibras Figura 1 están rodeadas por paredes intermedias, primarias y secundarias altamente lignificadas y rígidas. Las paredes secundarias se dividen en paredes exteriores (S_1), principales (S_2) e interiores (S_3) (Laverde et al., 2022).

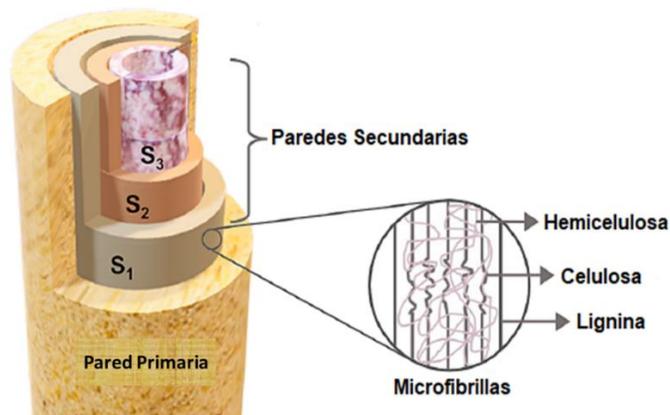


Figura 1 Estructura de una fibra vegetal
Adaptada de Laverde et al., 2022

4.3.1. Clasificación de las fibras

Las plantas que se cultivan para producir fibras naturales se clasifican como fibras primarias se cultivan por su contenido y calidad de la fibra (yute, cáñamo, kenaf y sisal) y las fibras secundarias que son provenientes o son residuos de plantas cultivadas para obtener frutos (piña, plátano, y fibra de coco) según su uso (Faruk et al., 2012). Además, las fibras secundarias a menudo se eliminan como residuos. Sin embargo, la utilización de estas fibras puede reducir los problemas de eliminación de residuos (Parameswaranpillai et al., 2023).

4.3.2. Composición de la fibra

Las fibras vegetales están compuestas de celulosa siendo este el componente más importante de las fibras vegetales presente en la pared celular que le va proporcionar fuerzas a las fibras, otros de los compuestos presentes en esta es la hemicelulosa que es la encargada de rodear a la celulosa así dándole rigidez a la fibra y la lignina que es un adhesivo natural que une la celulosa, la hemicelulosa, la pectina y los materiales cerosos (Parameswaranpillai et al., 2023).

4.3.2.1. Celulosa

Es un polímero natural Figura 2 que consta de unidades repetitivas de D-anhidroglucosa ($C_6H_{10}O_5$) unidades por enlaces 1,4- β -d-glucosídicos en las posiciones C_1 y C_4 . El grado de polimerización es de aproximadamente 10000 unidades. Cada unidad repetida contiene tres grupos hidroxilo. Estos grupos hidroxilo y su capacidad para formar enlaces de hidrogeno juegan un papel importante de la dirección del empaquetamiento de cristales y también controlan las propiedades físicas de la celulosa.

La celulosa solida forma una estructura microcristalina con regiones de orden superiores, cristalinas y regiones de orden inferior, amorfas. La celulosa también se compone de varillas delgadas, como microfibrillas cristalinas. La naturaleza cristalina (mariposa monocíclica) de la celulosa nativa se conoce como celulosa I. la celulosa es resistente a los álcalis fuertes (17,5% en peso), pero los ácidos la hidrolizan fácilmente en azúcares solubles en agua. La celulosa es relativamente resistente a los agentes oxidantes (John & Thomas, 2008).

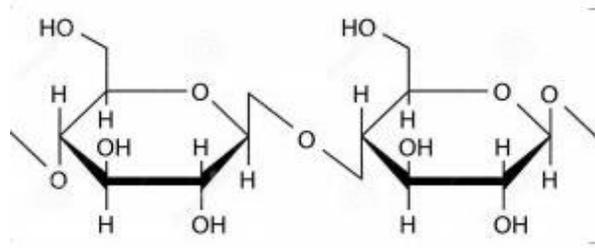


Figura 2 Estructura de la celulosa
Tomado de John & Thomas, 2008

4.3.2.2. Hemicelulosa

No es una forma de celulosa y el nombre es inapropiado. Consisten en un grupo de polisacáridos que consta de azúcares anulares de 5 carbonos y azúcares anulares de 6 carbonos. La hemicelulosa difiere de la celulosa en tres aspectos. Primero, contiene varias unidades de 1,4- β -d-glucopiranosas. En segundo lugar, exhiben un grado considerable de ramificación de cadenas, que contienen grupos colgantes, lo que contribuye a su naturaleza no cristalina, mientras que la celulosa natural es de 10 a 100 veces superior al de la hemicelulosa. El grado de polimerización de la hemicelulosa es de aproximadamente 50 a 300. La hemicelulosa forma una matriz de soporte para las microfibrillas de celulosa. La hemicelulosa es altamente hidrofílica, soluble en álcali y fácilmente hidrolizada en ácido (John & Thomas, 2008)

4.3.2.3. Lignina

La palabra se deriva de lignum que significa “madera”. Es uno de los principales componentes de la biomasa lignocelulósica. La lignina Figura 3 es el segundo material orgánico complejo natural más abundante en la tierra. Tradicionalmente se ha considerado chatarra de bajo valor. Sin embargo, se ha establecido que la lignina se puede utilizar para fabricar productos de alto valor como gas de síntesis, fibra de carbono, compuestos fenólicos, diversos productos oxidados e hidrocarburos multifuncionales.

Actualmente, las plantas de celulosa y papel de todo el mundo producen entre 50 y 70 millones de toneladas de lignina al año. Se estima que esta cifra aumentaría en 225 millones de toneladas por año para 2030 a medida que aumenta la producción anual de lignina. La estructura de la lignina varía según el proceso de extracción y la presencia de varios grupos funcionales. La lignina tiene diferentes grupos funcionales, tales como: hidroxilo, metoxi, carbonilo y carboxilo, etc.

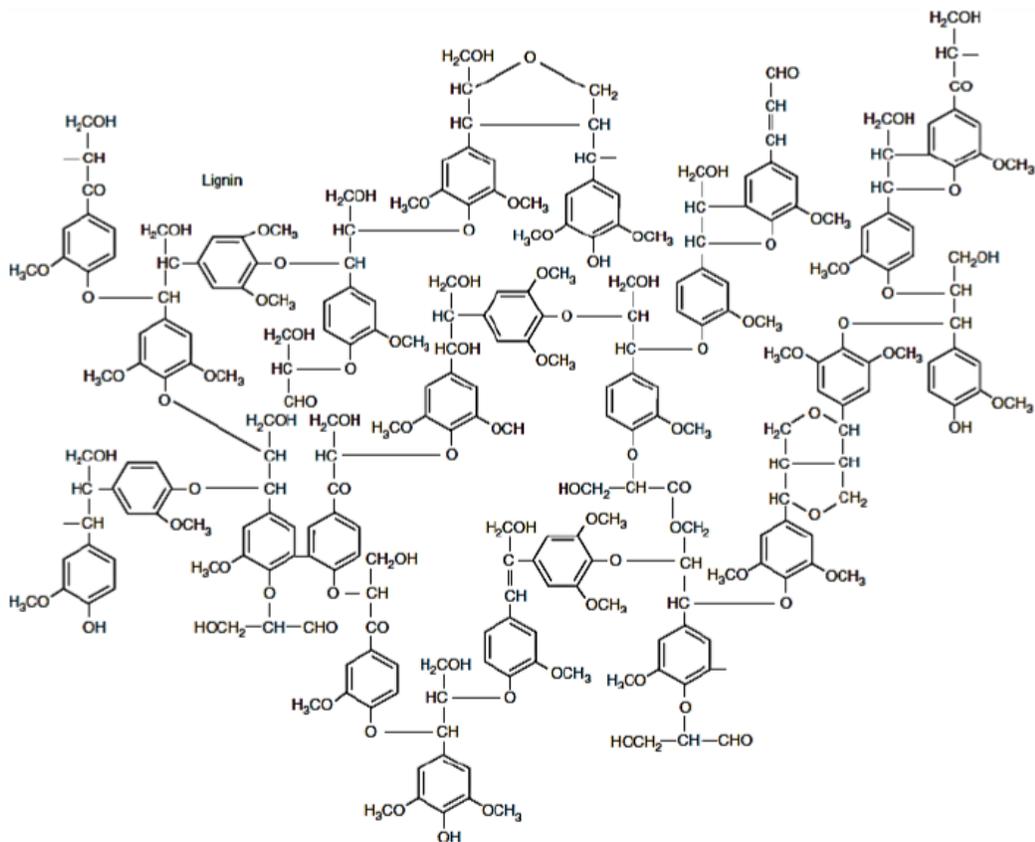


Figura 3 Estructura de la lignina
Tomado de: R. Yadav et al., 2023

La lignina tiene tres tipos básicos de monómeros Figura 4: alcohol coniferílico, alcohol sinapílico y alcohol p-cumarílico, también conocido como alcohol de lignina (Bajwa et al., 2019; R. Yadav et al., 2023)

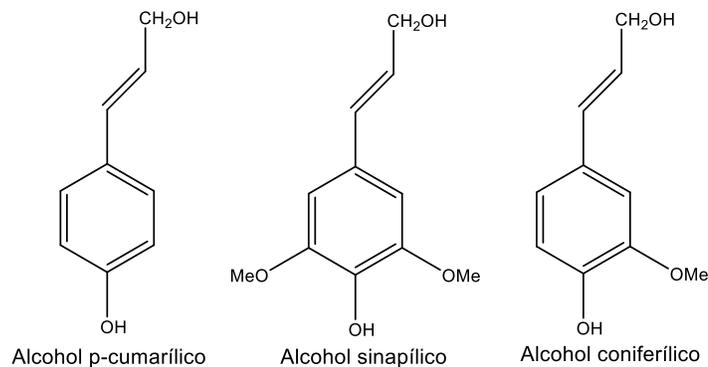


Figura 4 Componentes de la lignina
Adaptado de: Yadav et al., 2023

4.4. Fique

El fique es una planta originaria de Colombia conocida científicamente con el nombre de *Furcraea sp*, y de la cual se extrae una fibra natural (cabuya). Dentro del proceso de extracción de la fibra solo se aprovecha el 4% del peso total de la hoja el restante 96%, conocido tradicionalmente como 'bagazo', generalmente es desaprovechado y en muchas ocasiones produce un impacto negativo sobre el medio ambiente, contaminando las aguas a través del proceso de lavado de la cabuya (Echeverry Echeverry et al., 2015).

El fique es una planta andina utilizada tradicionalmente para obtener fibras de celulosa dura. Históricamente, solo sus fibras han tenido una aplicación comercial en la fabricación de cordeles, textiles, artesanías y materiales de empaque, equivalente al 4% de todos los materiales obtenidos después del procesamiento, y están disponibles en el mercado colombiano durante todo el año (Salasinska et al., 2016).

4.5. Tratamientos de las fibras

El pretratamiento es fundamental para aumentar la accesibilidad superficial y la permeabilidad de la celulosa y la hemicelulosa. Un pretratamiento ideal debe tener una alta tasa de conversión, ser energéticamente eficiente, ambientalmente benigno y producir los productos químicos inhibidores o menos peligrosos. El proceso de pretratamiento disminuye la cristalinidad de la celulosa, lo que percute en su accesibilidad hacia las enzimas. Al retener los elementos clave de una deconstrucción efectiva, es crucial asegurar la eficacia de un método de pretratamiento.

En este sentido, la eficiencia de un método de pretratamiento depende de su capacidad para: (1) deslignificar sin alterar significativamente la estructura de la lignina nativa; (2) bajo consumo de energía; (3) operación rentable; (4) disminuir el índice de cristalinidad de la celulosa; (5) reducir el tamaño de partícula para mejorar el área superficial para mejorar la hidrólisis enzimática; (6) pre-tratar varios tipos de materias primas y (7) evitar la producción de inhibidores de enzimas (A. Yadav et al., 2023).

4.5.1. Tratamiento químico

Las modificaciones químicas a las fibras con hidróxido, con silanos, la acetilación, la benzoilación y el tratamiento con peróxido pueden mejorar la adhesión al sustrato y reducir la hidrofilia (Mohammed et al., 2022).

4.5.1.1. Tratamiento silanos

Este consiste en usar la metodología con agentes de acoplamiento de silano SiH_4 , el cual cubre los microporos de la superficie de la fibra. Estos ayudan a reducir los grupos hidroxilos de las fibras y van a proporcionar una mejor interfaz. El grupo alcoxi hidrolizable lleva a la formación de silanoles en presencia de humedad. Los grupos hidroxilos presentes en la fibra natural reaccionan con el silano a través de un enlace covalente haciéndolos estables en la pared celular, que serán adsorbidos químicamente en la superficie de esta (Mohammed et al., 2022).

A continuación, se describe el tratamiento alcalino que se usó en este trabajo

4.5.1.2. Tratamiento alcalino

El tratamiento químico de las fibras con hidróxido es una de las opciones más fáciles, económicas y efectivas para mejorar la hidrofobicidad y las propiedades de adhesión a los sustratos. Este método utiliza hidróxidos de sodio (NaOH) para modificar la estructura molecular de la celulosa. El tratamiento alcalino acelera la fragmentación y despolimerización de las fibras. Este tratamiento alcalino consiste en sumergirlas fibras en una solución de NaOH durante un periodo de tiempo específico. Por lo tanto, conduce al desarrollo de una topografía de superficie rugosa, que mejora la adhesión en la interfaz fibra matriz y mejora las propiedades mecánicas. Además, la mercerización aumenta los sitios activos de las fibras, lo que conduce a una mejor humectación de las fibras (Mohammed et al., 2022).

4.6. Fenómenos de Adsorción

El proceso de adsorción ocurre cuando las moléculas de gas o líquido (a ser absorbidas) se unen a la superficie de un sólido o líquido adsorbente y forman una película molecular o atómica Figura 5. Esto sucede debido a fuerzas desequilibradas o residuales en la superficie de la fase líquida o sólida. Las fuerzas de desequilibrio residual continúan atrayendo y reteniendo especies moleculares a medida que alcanzan la superficie. La adsorción es la fuerza de atracción entre el

adsorbato y el adsorbente surge debido a las fuerzas de unión como la fuerza de Van der Waals (fuerza débil) o el enlace covalente (fuerza fuerte).

La adsorción es un proceso interactivo que une componentes en fase líquida a la superficie de un adsorbente sólido a través de interacciones físicas o químicas (dependiendo de las fuerzas intermoleculares). Esto se conoce como proceso de separación y se utiliza para separar iones metálicos seleccionados de una mezcla de reacción y se puede realizar en experimentos por lotes, semilotes o continuos (Rudi et al., 2020).

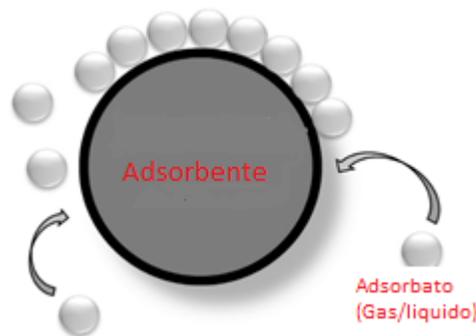


Figura 5 Fenómeno de adsorción
Tomado de: Rudi et al., 2020

4.6.1. Fenómenos de adsorción

4.6.1.1. La adsorción física

Esta ocurre cuando los adsorbentes y los adsorbatos experimentan fuerzas débiles de Van der Waals, enlaces de hidrógeno, interacciones polares y dipolo-dipolo. Este proceso físico adsorbe electrostáticamente iones metálicos en la superficie del material. Además, la temperatura a la que se produce este proceso es inferior o casi igual a la temperatura de los componentes adsorbidos. La fisisorción permite la formación de procesos de adsorción multicapa que proporcionan altas capacidades de adsorción.

4.6.1.2. Adsorción química

Es el proceso de enlace químico o transferencia de electrones entre el adsorbato y la superficie adsorbente. Esta es una reacción permanente llamada adsorción activada, que requiere una alta energía de activación. A diferencia de la adsorción física, el proceso de adsorción química es irreversible. La quimisorción se limita a la

adsorción en monocapa eliminando selectivamente especies trazas de soluciones acuosas. Por lo tanto, la regeneración y reutilización de adsorbentes también son difíciles debido a sus reacciones irreversibles (Rudi et al., 2020). Los estudios que hay en la literatura son enfocados más en descontaminación de metales pesados en aguas residuales, como lo reporta (Parra Reyes, 2022) en su trabajo de grado la adsorción de diferentes metales en fibras de fique.

4.6.2. Factores que influyen en procesos de adsorción

4.6.2.1. Propiedades del Adsorbato

Los iones metálicos según sus propiedades se van a considerar en la escala de dureza, como iones duros o iones blandos, los iones duros como el Mg^{2+} seleccionan grupos funcionales que contienen oxígeno (OH^- , $C=O$, $R-COO^-$ entre otros) y generan interacciones electroestáticas, mientras que los iones blandos como Ag^+ o Hg^{2+} generalmente enlaces covalentes o interacciones de coordinación. Con base en esta clasificación, los materiales que presentan los grupos funcionales más adecuados para la unión de los analitos de interés (Carro de Diego, 2012).

4.6.2.2. El pH

Uno de los factores claves para el proceso de adsorción es el pH, ya que este afecta la capacidad de adsorción del analito donde se va adsorber, esto puede ocurrir en tres formas: los sitios activos de la biomasa cambian con el pH, lo que los hará más disponibles o menos disponibles alterando la estructura del material; siendo la base de la especiación, la solubilidad de los metales en solución y el comportamiento en el rango del pH ayudara a describir un posible mecanismo que esté ocurriendo y la determinación del valor óptimo del pH va a brindar información sobre que especies son más dominantes en ese pH (Carro de Diego, 2012).

4.6.2.3. Características del adsorbente

Es importante conocer las propiedades físicas y químicas del adsorbente, teniendo en la parte química, el tipo y número de grupos funcionales presentes en la estructura, la disponibilidad, su estado químico y su afinidad por el metal, mientras que, por el lado físico del material, como los poros presentes, el tamaño de partícula y la etapa de crecimiento alcanzada por el material adsorbente o las diferentes fuentes del mismo material pueden afectar el proceso de adsorción. El pretratamiento del material es crítico para su posterior uso y este podría afectar la

capacidad de unión, como ya se mencionó en los tratamientos que se les hace a estos tipos de materiales. En nuestro trabajo el tratamiento se hará comuna solución alcalina para modificar la superficie, también se les puede realizar pequeñas modificaciones químicas a la biomasa para mejorar su capacidad de captación de compuestos ejemplo con silanos mencionados en el tratamiento de las fibras (Carro de Diego, 2012).

4.6.2.4. Fuerza Iónica

Junto con el pH son uno d ellos factores a tener en cuenta en el proceso de adsorción, ya que, la adsorción de los metales aumenta con la disminución de la fuerza iónica, debido a la competencia por los sitios activos de unión entre la matriz y los iones. Los iones como Na^+ o Mg^{2+} aumentarán la fuerza iónica de la solución y reducirán la adsorción de otros metales. La explicación de este efecto es que estos iones (generalmente iones duros) pueden competir con los metales por los sitios de unión a través de procesos electrostáticos. En otros casos, la presencia de sales conduce a la formación de complejos con los metales en solución, modificando su morfología y por tanto su capacidad de unión a los grupos funcionales presentes en la biomasa (Carro de Diego, 2012).

4.6.2.5. Temperatura

La temperatura es un parámetro a tener en cuenta ya que puede afectar directamente las interacciones que podrían presentarse entre el adsorbato y el adsorbente, presentando una adsorción constante en determinada temperatura. Esto puede dar a entender una posible eliminación de un compuesto por un mecanismo de intercambio iónico al ser un proceso independiente de la temperatura. Pero en general la temperatura va tener muy poco efecto sobre la capacidad de adsorción.

En algunos casos, es mejor al aumentar la temperatura, lo que indica un proceso endotérmico, esta tendencia indica que, al aumentar este parámetro, el número de sitios activos involucrados en la unión al compuesto es mayor, o la afinidad adsorbente/adsorbato es mayor. En otros casos, sin embargo, el aumento de la temperatura afecta o altera la estructura del material, reduciendo así la adsorción (Carro de Diego, 2012).

4.6.2.6. Tiempo de contacto

Es muy importante conocer el tiempo de equilibrio que hay entre el adsorbato y adsorbente, ya que este será muy importante para estudios posteriores y optimizaciones del proceso, así como el conocimiento de la cinética del propio proceso. El tiempo de reacción también puede depender de otras condiciones experimentales, como la concentración de iones metálicos o compuestos orgánicos/biomasa es de corta duración y alcanza el equilibrio en horas o incluso minutos (Carro de Diego, 2012).

4.6.2.7. Tamaño de partícula

La presencia de un mayor número de sitios activos disponibles para las reacciones y el más fácil acceso a ellos por parte del adsorbato, con menor restricción de difusión dentro de los poros, es responsable de la mayor capacidad de retención se logra con la disminución del tamaño de partícula (Izquierdo, 2010).

4.6.3. Bioadsorción

La biosorción se define como el proceso de concentración de un adsorbato y el prefijo “bio” indica que el adsorbente es de origen biológico, es decir, una superficie de sustrato biológico. Las ventajas de este proceso son el uso de adsorbentes de bajo costo operativos.

El proceso es simple de operar y es muy similar a la adsorción convencional o al intercambio de iones, excepto que se utiliza un sorbente de origen biológico. Los biosorbentes son selectivos y regenerables. Los biosorbentes se pueden recolectar directamente del medio ambiente (como las algas marinas) y desechos o subproductos de la industria (Chojnacka, 2010).

4.6.4. Cinética de adsorción

En la adsorción, como proceso variable en el tiempo, es necesario conocer su tasa para el diseño y evaluación de adsorbentes. Para representar el modelo cinético de adsorción, se utilizan dos criterios: la concentración de la solución o la carga sobre el adsorbente. En general, el modelo de Lagergren es de pseudo-primero orden y el modelo de Ho es de pseudo-segundo orden (Figuerola et al., 2015).

4.6.4.1. Modelo pseudo-primer orden

El modelo de pseudo-primer orden se puede expresar como Ecuación 1.

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde q_e y q_t son las cantidades de metal adsorbidas en el equilibrio y en un tiempo dado t respectivamente, k_1 es la constante de velocidad de primer orden. La forma lineal es Ecuación 2.

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad \text{Ecuación 2}$$

Una gráfica de “ $\ln(q_e - q_t)$ ” frente a “ t ” debe generar una línea recta con intersección en “ $\ln q_e$ ” y pendiente de “ $-k_1$ ”. El valor de “ q_e ” se puede calcular y comparar con el experimental (Farooq et al., 2010).

4.6.2.2. Modelo pseudo segundo orden

El modelo de pseudo segundo orden se muestra en la Ecuación 3.

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad \text{Ecuación 3}$$

Un gráfico de $\frac{t}{q_t}$ frente a t debería generar una línea recta con una intersección de $\frac{1}{k_2(k_2^2)}$ y pendiente de $\frac{1}{q_e}$. El valor de q_e puede calcularse y compararse con el obtenido a través de experimento (Farooq et al., 2010).

4.6.5. Estudio de equilibrio

Los modelos de equilibrio se utilizan ampliamente para estudiar la cantidad de iones metálicos adsorbidos por una determinada biomasa. La distribución de iones metálicos entre la solución y la biomasa es una medida de la posición de equilibrio y puede representarse mediante una o más isothermas. El modelo de Langmuir, el modelo de Freundlich, el modelo de Tempkin y el modelo de Dubinin-Radushkevich (D-R) son algunos ejemplos, siendo los más comunes el modelo de adsorción monocapa y el modelo de adsorción multicapa de Freundlich desarrollados por Langmuir.

4.6.5.1. Isoterma Langmuir

La isoterma de Langmuir se basa en la adsorción de que todos los sitios de adsorción en una adsorbente estructuralmente homogéneo son idénticos y energéticamente equivalentes. La adsorción tiene lugar en una monocapa, sin interacciones laterales entre las moléculas adsorbidas sobre una superficie energéticamente homogénea. La capacidad de saturación se puede expresar como una forma lineal de la ecuación de Langmuir se presenta a continuación Ecuación 5.

$$\frac{c_e}{q_e} = \frac{1}{q_{max}K_L} + \frac{c_e}{q_{max}} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde C_e es la concentración de equilibrio del adsorbato (mg/L), q_e es la cantidad de adsorbato de equilibrio por unidad de peso del adsorbente (mg/g), q_{max} es la cantidad del adsorbente (mg/g) y K_L es la constante de adsorción de Langmuir (L/mg), q_{max} y K_L se calculan trazando $\frac{C_e}{q_e}$ vs C_e (A.O, 2012; Mendoza, 2022).

4.6.5.2. Isoterma Freundlich

El modelo de Freundlich se aplica al equilibrio de adsorción de gases sobre sólidos y la adsorción de sustancias en solución sobre adsorbentes sólidos. La isoterma de Freundlich describe la adsorción en superficies energéticamente heterogéneas. En este modelo, hay constantes relacionadas con la capacidad de adsorción multicapa y la fuerza de adsorción. La forma lineal de la isoterma se puede expresar mediante la siguiente Ecuación 6.

$$\ln \ln q_e = \ln \ln k_f + \frac{1}{n} \ln \ln C_e \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde q_e es la concentración de iones en equilibrio en el adsorbente (mg/g), C_e es la concentración de iones de equilibrio (mg/L); K_f (L/g) y n son constantes de Freundlich. K_f y n indican la capacidad de adsorción del adsorbente y una medida de la desviación de la linealidad de la adsorción, respectivamente. Cuando el $\ln q_e$ se traza vs $\ln C_e$, K_f y n son calculados a partir de la intersección y la pendiente del modelo de regresión (Mendoza, 2022).

4.7. Diseños experimentales

Debido a la influencia de múltiples factores, mejorar la eficiencia de la biosorción mediante métodos clásicos es lento y costoso. Estas pueden mejorar mediante la optimización utilizando diseños de Plackett-Burman y Box-Behnken, reduciendo así el número de experimentos. El proceso de biosorción es un sistema complejo cuya eficiencia se ve significativamente afectada por múltiples variables, incluida la biomasa como material adsorbente; la disponibilidad y concentración de especies adsorbidas; y factores fisicoquímicos como la temperatura. El pH y el tiempo de contacto.

4.7.1. Diseño Plackett-Burman

Para el análisis de las variables que se consideran afectan la adsorción de Mg^{2+} en fique se aplicó el diseño de Plackett-Burman para determinar los factores más significativos Tabla 1. Teniendo en cuenta que no se pudo determinar el área superficial de la fibra de fique, que determina la capacidad de la forma porosa o del polvo adsorbente, así como la solvatación del metal que afecta la cantidad de adsorbato que puede coordinarse con la fibra, se denominaron estos factores como confusos a fin de que no invaliden el diseño experimental.

Tabla 1 Variables para evaluar la adsorción Mg^{2+}
Variabes (Uds)

Cantidad de adsorbente (g)
Tiempo (h)
Temperatura (°C)
pH
Tamaño partícula (μg)

4.7.2. Diseño Box-Behnken

Un diseño Box-Behnken es un tipo de diseño de superficie de respuesta que no tiene un diseño factorial o factorial fraccionado incrustado, para el diseño Box-Behnken los puntos de diseño se sitúan en 3 niveles: bajo, medio y alto. Sin embargo, dado que son diseños que no tienen un factorial incrustado, no son aconsejables para experimentos secuenciales. Estos diseños pueden ser útiles si se conoce la zona de operaciones segura del proceso. Al no tener puntos axiales,

se puede estar seguro de que todos los puntos del diseño se encuentran dentro de su zona operación segura.

4.8. Calidad de media analítica

Cualquier evaluación de los errores de medida debe tener en cuenta el proceso analítico global: incluyendo las etapas de muestreo, que a menudo contribuyen al error global muy significativo, las características de los análisis acometidos en cada laboratorio. Finalmente, los resultados analíticos se deben suministrar como una estimación realista de sus incertidumbres, es decir, el intervalo dentro del cual está ubicado el verdadero valor de la cantidad que es medida (Miller & Miller, 2002).

4.8.1. Incertidumbre

Es el parámetro que describe un intervalo dentro del cual se espera que se encuentre la cantidad medida, teniendo en cuenta todas fuentes de error. Para expresar la incertidumbre se emplean símbolos. La incertidumbre estándar (u) expresa el concepto como una desviación estándar. La incertidumbre expandida (U) define un intervalo que abarca una fracción grande de valores dentro de los cuales caerá la cantidad que se está midiendo y se obtiene multiplicando (u) por un factor de cobertura, k , elegido según el grado de confianza, es decir $U=u*k$. Puesto que, u es análoga a una desviación estándar, si k es 2, entonces U proporciona aproximadamente una mitad del intervalo de confianza del 95% (Miller & Miller, 2002).

5. METODOLOGÍA

5.1. Reactivos

Se usaron los reactivos Cloruro de Magnesio Hexahidratado ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) de Mallinckrodt CHEMICALS con una pureza del 99%; Fosfato de Potasio Dibásico (K_2HPO_4) de Mallinckrodt con un porcentaje de pureza del 99%; para la preparación de la solución coloreadora se usó Ácido Sulfúrico (H_2SO_4) de Honeywell Fluka con una pureza del 95-97%; Molibdato de Amonio Tetrahidratado ($(NH_4)_6 Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$) de AppliChem Panreac; Tartrato de Antimonio y Potasio Hemihidratado ($K(SbO)C_4H_4O_6 \cdot 0,5H_2O$) de MERCK; Ácido Ascórbico ($C_6H_8O_6$) de Mallinckrodt; Ácido Nítrico (HNO_3) de HoneyWell al 70% de pureza; Acido Perclórico ($HClO_4$) de Mallinckrodt CHEMICALS con una pureza del 70%. Todas las soluciones se prepararon con agua Tipo I.

5.2. Preparación del aserrín de fique

El aserrín de fique se usó como materia prima fue facilitado por la empresa Empaques del Cauca ubicada en la ciudad de Popayán, donde se recolecto la muestra de cada una de las maquinas que operan dentro de esta, se homogeniza y se realiza cuarteo hasta obtener 5 Kg como muestra representativa, la cual se trasladó a las instalaciones del laboratorio de agroquímica en la Universidad del Cauca, el residuo sólido fue sometido a un proceso de limpieza manual, se retiraron impurezas para su posterior secado a temperatura ambiente.

Para tener una muestra en condiciones óptimas se realizó un lavado con agua desionizada a 60 °C por 2 horas con una agitación cada 10 minutos, se filtró y se procede a llevarla al horno WTC Binder durante 24 horas a 40 °C, después de lo cual el residuo se dejó a temperatura ambiente durante una semana para una hidratación natural, con el fin de homogenizar el tamaño del aserrín de fique se pasó por un molino de corte Retsch SK 100 Standard Spezst 1 con tamices de 1; 0,618 y 0,212 mm de tamaño de partícula.

5.3. Caracterización fisicoquímica del residuo agroindustrial

Las siguientes determinaciones se realizaron por triplicado con el fin de determinar el promedio Ecuación 7, la desviación estándar Ecuación 8 y el intervalo de confianza Ecuación 9 con un 95% de confianza (t-student 4,3027).

$$\bar{x} = \frac{\sum_i^n x_i}{n} \quad \text{Ecuación 7}$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_i(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad \text{Ecuación 8}$$

$$\mu = \bar{x} \pm \frac{ts}{\sqrt{n}} \quad \text{Ecuación 9}$$

5.3.1. Determinación de Humedad

La determinación de humedad en el residuo de fique se realizó mediante la técnica deshidratación completa por evaporación, esto seguido al protocolo del grupo de investigación, se pesan 5,0 g de fique en una caja Petri previamente lavada, secada y pesada, esta es llevada a la estufa WTC Binder con una temperatura de 105 °C por 24 h, posteriormente se dejó enfriar en desecador hasta peso constante, para la determinación de humedad nos basamos en la Ecuación 10.

$$\% \text{ Humedad} = \frac{(P_1 - P_2)}{m} * 100 \quad \text{Ecuación 10}$$

P₁: Peso de la cápsula más muestra

P₂: Peso de la cápsula + muestra seca

M: Peso de la muestra

5.3.2. Cenizas

Para la determinación de cenizas Ecuación 11 se lleva a cabo a través del método gravimétrico, el cual, se toma 1,0 g de muestra (fique) en un crisol de porcelana previamente lavado, secado, pesado y se coloca en la mufla con una rampa de temperatura como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2 Rampa temperatura determinación de cenizas

Rampa	Temperatura (°C)	Tiempo de subida (min)	Tiempo que se mantiene (min)
1	100	30	30
2	250	30	30
3	400	60	60
4	650	90	150

$$\%Cenizas = \frac{W_{cc} - W_c}{W_{cm} - W_c} * 100 \quad \text{Ecuación 11}$$

W_c : Peso del crisol

W_{cm} : Peso del crisol + muestra

W_{cc} : Peso del crisol + cenizas

5.3.3. Determinación de C_{org} ; S y N

Para la determinación de C_{org} ($\%C_{org}$), Azufre ($\%S$) y Nitrógeno ($\%N$) se realizó según los protocolos establecidos por el grupo de investigación Agroquímica de la Universidad del Cauca y basados en normas internacionales (AOAC, 1990).

5.3.4. Espectroscopia infrarroja IR

Las muestras son analizadas mediante espectroscopia de infrarrojo, en un equipo Thermo IR-NICOLET iS10 con accesorio Smart iTR con punta de diamante (ATR), lectura en escala de transmitancia y rango de lectura entre 3000 y 400 cm^{-1} , esto con el fin de observar los grupos funcionales presentes.

5.3.5. Microscopía de Barrido Electrónico (SEM)

La muestra fue llevada al laboratorio de Reología y Empaques de la facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad del Cauca, las imágenes de la superficie se analizaron mediante la técnica Microscopía de Barrido Electrónico (SEM) en un equipo EVO MA15 de marca Carl Zeiss.

5.3.6. Extracción de Celulosa y Lignina

Con el residuo agroindustrial en condiciones para su uso, se realizara la extracción de los componentes (lignina y celulosa) que se encuentran presentes en este, la metodología implementada en este trabajo de grado para la extracción de celulosa y lignina se adaptó de la metodología estudiada en la Universidad de Tuskegee (Watkins et al., 2015).

Inicialmente se pesaron 5,0 g de fique al cual se le adicionan 50 mL una proporción 1:10 con respecto a la fibra de una mezcla de ácido orgánico al 85% (ácido fórmico/Ácido Acético 70:30), se coloca en reflujo durante 2 h, posteriormente se recoge el sobrenadante, la fibra es colocada nuevamente en reflujo con la misma cantidad inicial de ácido orgánico más 5 mL de peróxido de hidrógeno al 50%

durante otras 2 h. el residuo sólido resultante fue lavado con peróxido para un blanqueamiento y la obtención de la celulosa presente en la fibra.

Los filtrados obtenidos anteriormente se mezclan y se adiciona agua destilada en una proporción de 5 veces al filtrado final para la obtención de la lignina, se filtra y se seca, ya con la celulosa y la lignina extraídas estas son analizadas mediante la técnica de espectroscopia de infrarrojo, en un equipo Thermo IR NICOLET iS10 con un accesorio Smart iTR con punta de diamante (ATR), la lectura es en la escala de transmitancia y el rango de lectura entre 3000 y 400 cm^{-1} , así poder identificar los grupos funcionales de estos componentes.

5.4. Determinación Magnesio

La determinación de magnesio se realizó según la metodología expuesta en el manual de guía usado en el laboratorio de agroquímica para la determinación de bases de cambio tanto el tratamiento de muestra como su respectiva curva de calibración, donde, se realizó la evaluación de los parámetros óptimos para la adsorción de Mg^{2+} en el equipo de Absorción Atómica Thermo Solaar 5 series S4SN71203 de la Unidad de Análisis Industrial de la Universidad del Cauca, con sus respectivos elementos de uso en la absorción con llama, como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3 Parámetros equipos adsorción atómica
PARÁMETRO UNICAUCA

Tipo Ionización	Aire-Acetileno
Longitud Onda (nm)	285,2
Flujo gas (L/min)	1,1
Altura de mechero (mm)	7
Ancho banda (nm)	0,5
Corrección Fondo	Si
Corriente Lámpara (mA)	8
Patrón Chequeo (mg/L)	0,3

Para esta determinación se implementó un diseño según el modelo de Plackett-Burman con el fin de validar las variables más significativas, como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4 Variables adsorción diseño Plackett-Burman

Variable	Niveles
pH	5 y 9
Tamaño partícula (µm)	200 y 1000
Temperatura (°C)	5 y 25
Cantidad de adsorbente (g)	0,5 y 5
Tiempo (h)	0,5 y 6

Con las variables definidas más influyentes se realiza la respectiva valoración de estas con un diseño de Box-Behnken, para así optimizar estas variables y definir cuales infieren más en la adsorción del Mg^{2+} .

5.4.1. Preparación curva calibración

A partir del reactivo de Cloruro de Magnesio grado analítico (Numeral 5.1) se realizó la solución madre de 1000 mg/L de Mg^{2+} , posteriormente se realizan los 8 estándares de la curva de calibración para la cuantificación de Mg^{2+} además de un blanco con la ausencia del analito como se muestra en la Tabla 5 las concentraciones reales se sacan con la educación arrojada por la curva de calibración.

Tabla 5 Curva calibración, cuantificación Mg^{2+}

Estándar	Concentración Mg^{2+} (mg/L)
1	0,05
2	0,01
3	0,20
4	0,30
5	0,40
6	0,61
7	0,80
8	0,99

5.2. Determinación Fósforo

La determinación de la adsorción de fósforo se realizó mediante el método del ácido ascórbico tomado del *Standard Methods* el cual fue validado en el grupo de investigación por Salamanca2023, se basa en la medición con el espectrofotómetro UV-Vis marca Genesys de la Unidad de Análisis Industrial de la Universidad del Cauca a una longitud de onda 880 nm y se mide en función de HPO_4^{2-} , se toma el

aserrín de fique previamente adsorbido con Mg^{2+} , se pone en contacto con una solución de HPO_4^{2-} con concentración conocida, la concentración obtenida en la solución se le resta la concentración inicial de cada solución y el resultado de esta diferencia nos dará la concentración adsorbida de HPO_4^{2-} en el aserrín de fique

5.3. Procesos de Adsorción de Mg^{2+}

5.3.1. Determinación del tiempo de equilibrio

Se tomaron 0,5 g de aserrín de fique y se colocaron en contacto con la solución de Mg^{2+} , para determinar el tiempo de equilibrio se tomaron 6 muestras a diferentes tiempos 0; 0,5; 1; 1,5 y 2 horas, los tiempos son tomados arbitrariamente para evaluar en cuál de estos se presenta la adsorción más alta, las soluciones de Mg^{2+} tenían una concentración conocida y las muestras fueron analizadas por Absorción Atómica, la concentración obtenida en la solución se le resta la concentración inicial de cada solución y el resultado de esta diferencia nos dará la concentración adsorbida por el aserrín.

5.3.2. Capacidad de adsorción

Después de conocer el tiempo de equilibrio (Numeral 5.3.1.), se procede a evaluar la capacidad de adsorción del aserrín de fique, para lo cual se prepararon soluciones de Mg^{2+} a con concentraciones reales de cada solución se valoraron mediante la ecuación de la recta y su posterior análisis de adsorción del fique presente en cada muestra.

5.3.3. Isotherma de adsorción

Para la evaluación de la isoterma de adsorción correspondiente, y los datos experimentales obtenidos (Números 5.3.1 y 5.3.2) previamente, se valoró el modelo de adsorción más conveniente (Langmuir o Freundlich) con el mejor ajuste lineal de cada modelo.

5.3.4. Cinética de la reacción

Con el tiempo de equilibrio establecido procedemos a evaluar de forma preliminar la posible cinética de adsorción de Mg^{2+} en el aserrín de fique. Para el efecto se puso en contacto el aserrín de fique con la solución de Mg^{2+} de concentración

conocida tomando alícuotas de 2 mL cada 10 minutos en un tiempo de una hora. Con los datos obtenidos se observa si se ajustan al modelo matemático de pseudo primer orden o pseudo segundo orden.

5.4. Modificación fibra de fique

Con las variables determinadas en los diseños experimentales y el % Adsorción Mg^{2+} en la fibra de fique, se modificó la superficie de la fibra de fique, se toman 10 gramos de fique, se dejan en una solución de NaOH durante 4 horas, luego se toman 1,0303 g de este fique modificado (peso que arrojó la optimización de los parámetros en el Box-Behnken), se deja el fique en una solución de 50 mg Mg^{2+}/L durante 57 minutos y se analizó el % de Adsorción Mg^{2+} , se deja secar el fique dopado con Mg^{2+} y se toman los parámetros optimizados del trabajo de Salamanca (2023) (Salamanca, 2023) midiéndose la adsorción de HPO_4^{2-} antes y después de la modificación.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1. Caracterización del residuo agroindustrial (Humedad, Cenizas, C_{org}, Mg, P, IR, SEM, Celulosa y Lignina)

La caracterización fisicoquímica realizada al residuo agroindustrial de fique esta consignada en la Tabla 6, donde, podemos observar que el porcentaje de Carbono presente en la fibra es muy alto con un $48,95 \pm 7,81\%$; teniendo en cuenta que los principales componentes de la fibra de fique (Celulosa, Lignina y Hemicelulosa) tienen en su estructura como componente mayoritario al carbono (Grisales-Cifuentes et al., 2021), estas estructuras poseen grupos funcionales activos donde puede ocurrir la adsorción de algunos componentes, los grupos carbonilo, carboxilo, acetilo, hidroxilo, alcohol y amino son grupos responsables de la adsorción, los grupos hidroxilos y alcohol asociados a la celulosa pueden unirse a los metales (Babu et al., 2022).

Tabla 6 Caracterización residuo fique

PARÁMETRO	PORCENTAJE EN FIQUE
Humedad	$11,73 \pm 0,08$
Cenizas	$7,37 \pm 0,05$
Carbono	$48,95 \pm 7,81$
Nitrógeno	$0,71 \pm 0,02$
Magnesio	$0,023 \pm 0,011$
Fósforo	$0,22 \pm 0,01$
Azufre	$3,12 \pm 0,42$
Otro	$27,89 \pm 0,79$

Estudios realizados a otras fibras naturales como la *Furcraea foetida* reportan un porcentaje de contenido de Magnesio, Fósforo y Azufre no cuantificables para estos elementos (Manimaran et al., 2018), mientras que nuestra *Furcraea sp.* Estos valores son $0,023 \pm 0,011\%$, $0,22 \pm 0,01\%$ y $3,12 \pm 0,42\%$ respectivamente, se debe recordar que la composición de las fibras está directamente relaciona de la planta de origen y forma de extracción (Dias et al., 2023).

En la Tabla 7 podemos observar el porcentaje de humedad realizados a otras fibras naturales, donde la variación que presentan entre ellas va depender de la composición de las fibras, teniendo que estas influyen en las propiedades de las misma (Karim et al., 2023; Sheeba et al., 2023); es importante conocer este parámetro ya que podría generar problemas de compatibilidad e interacción con los

sitios de adsorción de las matrices, afectando la calidad interfacial y así alterar las propiedades en las interacciones fisicoquímicas del producto deseado (López et al., 2013). Autores reportan que para fibras de fique el porcentaje de humedad esta entre el 8 - 12 %, dentro del cual esta nuestra fibra de fique *Furcraea sp.* con un valor de $11,73 \pm 0,08$, como se muestra en la Tabla 7 (Laverde et al., 2022).

Tabla 7 Porcentajes Humedad diferentes fibras vegetales

Fibra	% Humedad	Referencia
<i>Furcraea sp</i>	11,73	Este trabajo
<i>Sansevieria cylindrica</i>	6,08	(Sreenivasan et al., 2011)
<i>Mikamia micrantha</i>	8,4	(Karim et al., 2023)
<i>Acacia pennata</i>	13,91	(Sheeba et al., 2023)
Fique	8-12	(Laverde et al., 2022)

En el caso del desecho lignocelulósicos, los porcentajes de composición química de celulosa, hemicelulosa y lignina están fuertemente influenciados por el tipo de fuente, así como por la edad, el clima y las condiciones del suelo, como ya se ha mencionado que los grupos funcionales que poseen estas estructuras serán directamente responsables de las interacciones posibles que den lugar a la adsorción en la fibra a estudiar. El contenido de cenizas refleja la cantidad de materia orgánica e inorgánica disponible en la materia y suele ser bajo < 5% (Girelli & Chiappini, 2023) el porcentaje que se obtuvo de cenizas de nuestra fibra es de 7,37%, es superior al de las otras fibras reportadas, pero muy similar a la *Furcraea foetida*, en la Tabla 8 se muestra una comparación de estas composiciones de la *Furcraea sp.* y otras fibras naturales.

Tabla 8 Composición química de *Furcraea sp* y otras fibras naturales

Fibra	% Celulosa	% Lignina	% Ceniza	Referencia
<i>Furcraea sp</i>	49,23	6,27	7,37	Este trabajo
<i>Furcraea foetida</i>	68,35	12,32	6,53	(Manimaran et al., 2018)
Bambú	37,50	27,80	1,2	(Hu et al., 2014)
Sisal	50-74	8,11	-o-	(Morán et al., 2008)
Hoja de palma aceitera	49,80	20,50	2,4	(Ajayi et al., 2016)

El espectro FTIR nos da las designaciones de los grupos funcionales en la fibra para la *Furcraea sp*, se presentan en la Figura 6, de acuerdo con los grupos funcionales químicos de la Tabla 9.

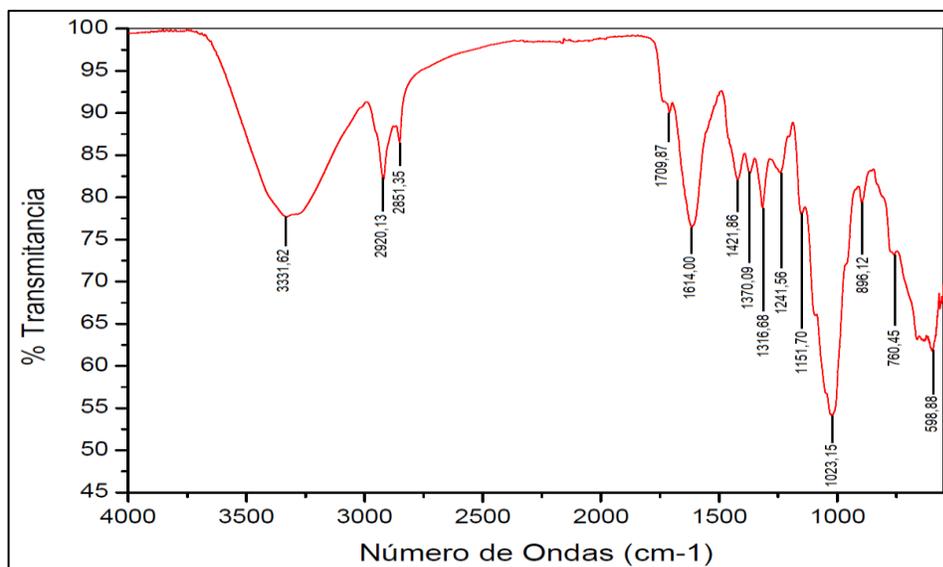


Figura 6 Espectro IR de la fibra *Furcraea sp*.

Tabla 9 Grupos funcionales encontrados en la fibra *Furcraea sp*.

Componente fibra	Número de onda (cm ⁻¹)	Grupo funcional	Compuestos
Celulosa	4000-2995	OH	Ácido. Metanol
	2890	H-C-H	Alquil alifático
	1270-1232	C-O-C	Aril-Alquil éter
	1170-1082	C-O-C	Esqueleto anillo piranosa
Hemicelulosa	4000-2995	OH	Ácido. Metanol
	2890	H-C-H	Alquil alifático
	1765-1715	C=O	Cetona. Carbonilo
Lignina	4000-2995	OH	Ácido. Metanol
	2890	H-C-H	Alquil alifático
	1730-1700		Aromáticos
	1613-1450	C=C	Estiramiento anillo benceno
	1270-1232	C-O-C	Aril-alkil éter
	700-900	C-H	Hidrógenos aromáticos

Los espectros IR de la fibra muestra señales típicas de la celulosa, el componente principal de las fibras de fique, ubicadas a 3336, 2916-2849 cm^{-1} estas señales corresponden a la vibración de los grupos O-H, H-C-H de la celulosa, hemicelulosa y lignina; a 1028 cm^{-1} C-O-C se encuentran un pico que se atribuye al enlace glucosídico en la celulosa, a 1159 cm^{-1} debido a las vibraciones esqueléticas del anillo de piranosa C-O-C (Iskalieva et al., 2012; Morán et al., 2008). Además, las señales a 1724 y 1237 cm^{-1} corresponden a vibraciones típicas del enlace C=O de hemicelulosa y vibraciones C-O-C de enlaces éter aromáticos en lignina, la señal de 1724 cm^{-1} se puede atribuir al estiramiento del anillo de benceno en la lignina.

La lignina presento picos característicos 1630 cm^{-1} correspondientes a la vibración esquelética aromática. Además, debido a la presencia de grupos funcionales como metoxilo -O-CH₃ y aromático C=C, se observó un pico a 1643 cm^{-1} y los picos 776,718 cm^{-1} corresponde a los aromáticos.

La determinación de la morfología para el residuo agroindustrial se realizó a través de la micrografía electrónica de barrido (SEM) Figura 7A, donde se logra observar que tiene una estructura heterogénea, estructura similar de la Figura 8D, es por ello que las hace tan atractivas por su irregularidad y por el efecto estabilizador de los grupos hidroxilos presentes en esta (Castellanos et al., 2012). Las fibras de fique podrían describirse como un compuesto natural constituido principalmente por microfibrillas de celulosa (refuerzo) enrolladas helicoidalmente en una matriz amorfa de lignina. Figura 7B y Figura 8C. La organización estructural exacta de los constituyentes químicos en las paredes celulares primarias y secundarias siguen siendo un tema de debate, sin embargo, se acepta comúnmente que la celulosa, la hemicelulosa y la lignina están dispuestas en entidades separadas y no mezcladas homogéneamente (Gómez Hoyos et al., 2012).

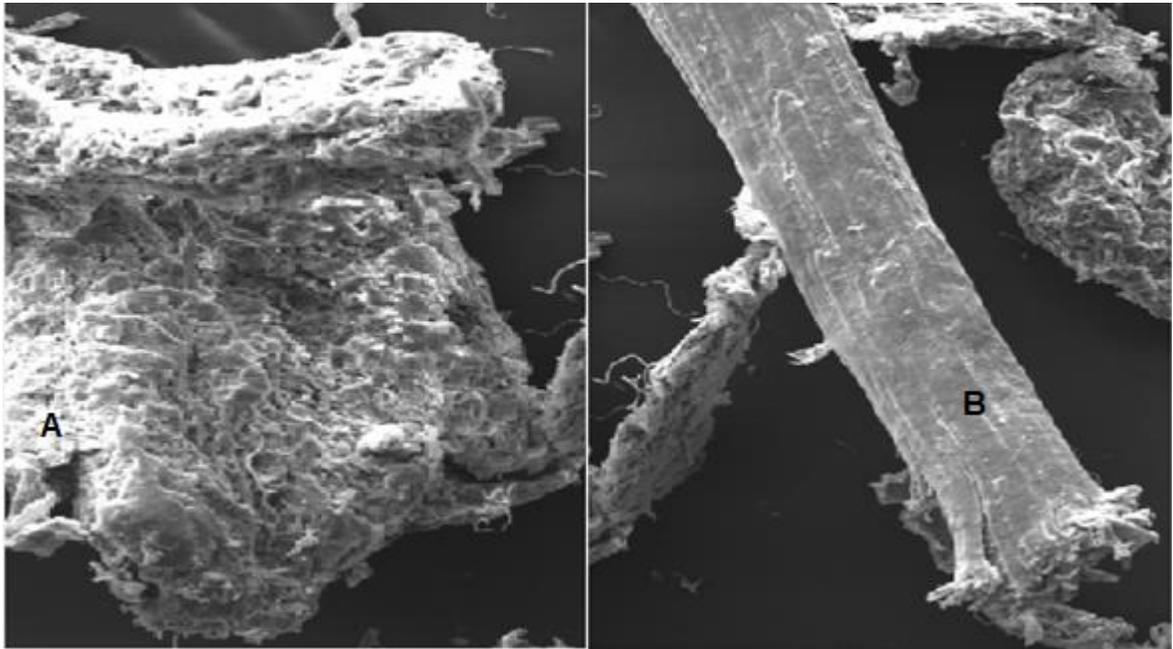


Figura 7 Micrografía SEM *Furcraea sp*

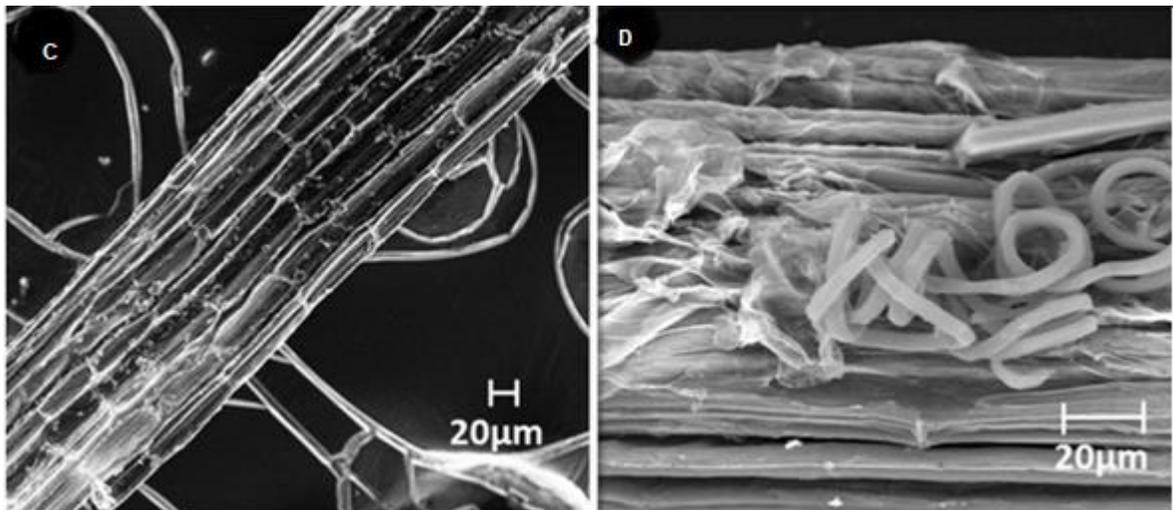


Figura 8 Micrografía SEM *Furcraea ssp.*
Tomado de (castellanos et al., 2012)

6.2. Diseños Experimentales

6.2.1. Plackett-Burman

Los resultados obtenidos para el diseño de Plackett-Burman (Para verificar las variables más significativas para el proceso de adsorción del Mg^{2+}), están consignadas en la Tabla 10.

Tabla 10 Diseño experimental Plackett-Burman

Orden Est	pH	Temperatura (°C)	Tamaño de partícula (µm)	Cantidad de absorbente (g)	Tiempo (h)	% Adsorción
14	9	25	200	2	0,5	55,54
17	9	25	200	2	6	49,14
6	9	25	1000	0,5	6	60,77
1	9	5	1000	0,5	0,5	56,70
5	9	25	200	2	6	51,47
24	5	5	200	0,5	0,5	51,03
2	9	25	200	2	0,5	59,03
19	5	25	1000	2	0,5	66,11
20	5	5	1000	2	6	57,99
15	5	25	1000	0,5	6	53,93
3	5	25	1000	0,5	6	55,09
8	5	5	1000	2	6	63,50
23	5	25	200	0,5	0,5	58,28
9	5	5	200	2	6	51,61
18	9	25	1000	0,5	6	57,28
7	5	25	1000	2	0,5	65,53
13	9	5	1000	0,5	0,5	56,70
22	9	5	200	0,5	6	54,09
10	9	5	200	0,5	6	55,54
11	5	25	200	0,5	0,5	55,67
12	5	5	200	0,5	0,5	51,03
21	5	5	200	2	6	55,09
16	9	5	1000	2	0,5	63,68
4	9	5	1000	2	0,5	63,39

Después de realizados los procedimientos de adsorción para el diseño del Plackett-Burman se realiza una prueba de normalidad con el fin de mirar la distribución de los resultados obtenidos, mediante la prueba de Shapiro-Wilk para una cantidad de datos inferiores a 50. En la Figura 9 se observa la gráfica para la prueba de normalidad, donde se plantearon la hipótesis nula H_0 : el conjunto de datos obtenidos proviene de una población normal y la hipótesis alternativa H_a : el conjunto de datos obtenidos no proviene de una población normal. Teniendo en cuenta que el valor de significancia obtenido es superior a 0,05 ($p > 0,05$) se acepta la hipótesis nula, obteniendo que los resultados del diseño vienen de una distribución normal.

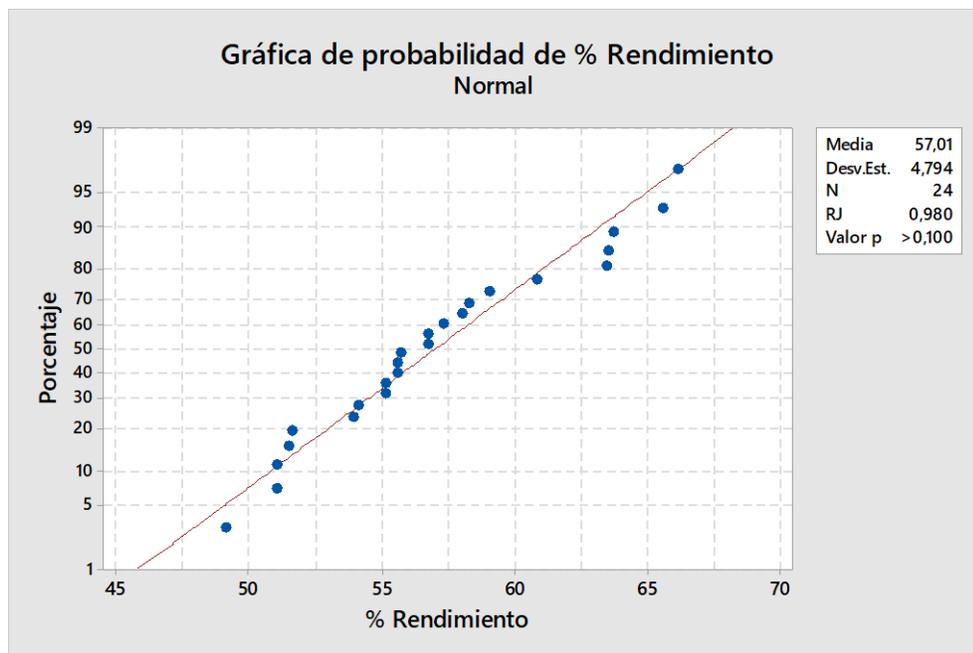


Figura 9 Prueba de normalidad Plackett-Burman

Los experimentos de Plackett-Burman mostraron una diferencia (49,14 a 66,11%) en los porcentajes de adsorción de magnesio esta variación reflejo la importancia del proceso de optimización para lograr la máxima adsorción de magnesio. La relación entre el porcentaje de adsorción de magnesio y las variables independientes se determinan mediante el análisis de varianza (ANOVA) del diseño experimental resumido en la Tabla 11, con lo cual podemos ver que hay factores que tienen una mayor significancia Valor p ($p < 0,05$), teniendo en cuenta esta significancia en las variables, podemos ver que la que mayor significancia tiene, es el tamaño de partícula con un valor de 0,000 , seguida de la cantidad de adsorbente con un valor de 0,037 y por último el tiempo con un valor de 0,032, mientras que el pH con un valor de 0,926 y la temperatura con un valor de 0,645, son valores con un $p > 0,05$ con lo cual podemos concluir que no son significativos para el proceso de adsorción.

Tabla 11 Análisis varianza diseño Plackett-Burman
ANOVA diseño Plackett-Burman adsorción de Mg²⁺

Fuente	GL	SC	MC	Valor F	Valor p
Modelo	5	336,944	67,389	6,33	0,001
pH	1	0,094	0,094	0,01	0,926
Temperatura (°C)	1	2,339	2,339	0,22	0,645
Tamaño de partícula (µm)	1	223,016	223,016	20,96	0,000
Cantidad adsorbente	1	53,875	53,875	5,06	0,037
Tiempo	1	57,620	57,620	5,41	0,032
Error	18	191,560	10,642		
Total	23	528,504			

Mediante el diagrama de Pareto (representación gráfica de la tabla ANOVA) en la Figura 10, se puede corroborar que las variables con mayor significancia en el proceso de adsorción de Mg²⁺ en el fique *Furcraea sp*, son el tamaño de partícula, la cantidad de adsorbente y el tiempo de contacto. Dentro del diagrama podemos ver que las barras que superen la línea de referencia línea roja (efecto estandarizado) será tomado como una variable con significancia dentro del proceso de adsorción, donde, dependiendo la longitud de la barra nos dice que tan significativo es esa variable en el proceso de adsorción.

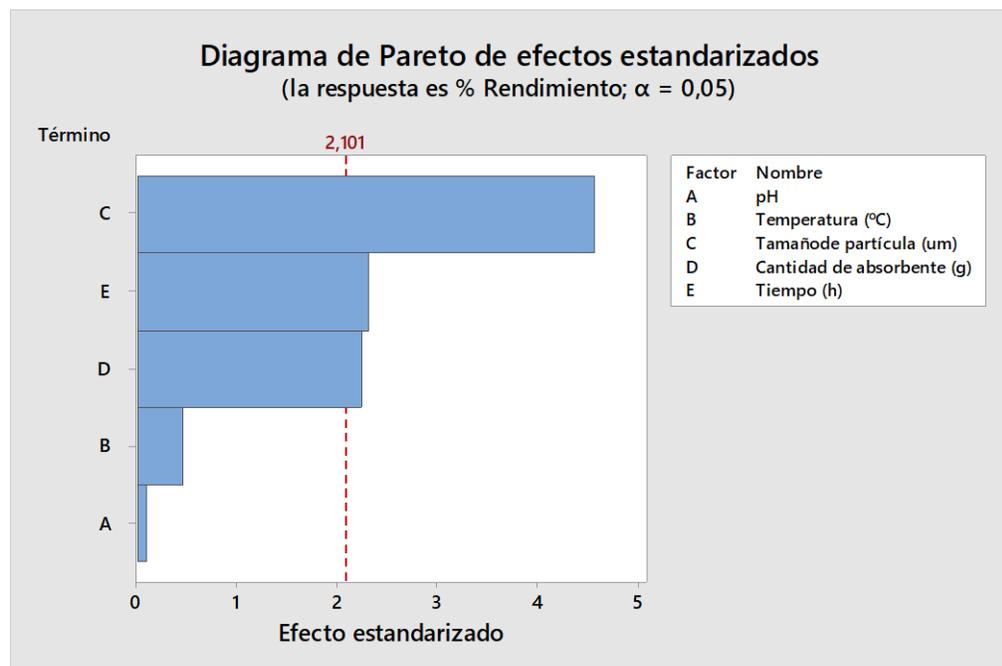


Figura 10 Diagrama Pareto diseño Plackett-Burman adsorción Mg²⁺

Teniendo en cuenta que las variables de pH y temperatura fueron las menos significativas, se dejaron en valores fijos en 5 y 25 °C respectivamente, teniendo en cuenta que estos valores son los que presentan una mayor influencia para obtener un máximo porcentaje de adsorción de Mg²⁺.

6.2.2. Box-Behnken

En la Tabla 12 se especifican los valores de interacción alta, media y baja de cada una de las variables más significativas para la adsorción de Mg²⁺ con el fin de optimizar este proceso, el cual se encuentra consignado en la Tabla 13, donde se tiene la cantidad de experimentos realizados por orden de corrida y porcentaje de adsorción.

Tabla 12 Interacciones optimización Box-Behnken

Interacción	Bajo	Medio	Alto
Tamaño partícula (µm)	200	600	1000
Cantidad de adsorbente (g)	0,5	1,25	2
Tiempo	0,5	3,25	6

Tabla 13 Diseño Box-Behnken

Orden Est	Tamaño partícula (um)	Cantidad adsorbente (g)	Tiempo (h)	% Adsorción
17	1000	0,5	3,25	82,275
4	1000	2	3,25	66,198
12	600	2	6	64,590
8	1000	1,25	6	62,982
28	600	1,25	3,25	66,600
27	600	2	6	61,374
1	200	0,5	3,25	58,963
18	200	2	3,25	58,963
29	600	1,25	3,25	65,796
5	200	1,25	0,5	63,786
26	600	0,5	6	61,977
20	200	1,25	0,5	64,590
23	1000	1,25	6	64,992
30	600	1,25	3,25	64,188
25	600	2	0,5	66,198
11	600	0,5	6	60,571
24	600	0,5	0,5	61,374
22	200	1,25	6	62,379
2	1000	0,5	3,25	61,374

6	1000	1,25	0,5	68,609
9	600	0,5	0,5	61,776
14	600	1,25	3,25	66,198
19	1000	2	3,25	63,786
3	200	2	3,25	58,561
13	600	1,25	3,25	66,198
7	200	1,25	6	62,580
15	600	1,25	3,25	66,600
21	1000	1,25	0,5	68,609
16	200	0,5	3,25	60,571
10	600	2	0,5	65,394

Para validar la información obtenida y verificar que los datos tuvieran una distribución normal y teniendo en cuenta que la cantidad de muestra es inferior a 50 se realizó la prueba de Shapiro-Wilk. En el diagrama de la Figura 11 observamos la gráfica de probabilidad del porcentaje de adsorción, considerando que el valor de significancia es superior a 0,05 se plantearon la hipótesis nula H_0 : el conjunto de los datos obtenidos proviene de una población normal y la hipótesis alternativa H_a : el conjunto de datos obtenidos no provienen de una población normal, el cual nos da que $p < 0,05$ lo cual se acepta la hipótesis alterna, obteniendo que los resultados del diseño no provienen de una distribución normal. Sin embargo, teniendo en cuenta que el diseño Box-Behnken se empleó para determinar las mejores condiciones para optimizar la respuesta (adsorción de Mg^{2+}) no se emitieron resultados de ANOVA y se centró en la superficie de respuesta.

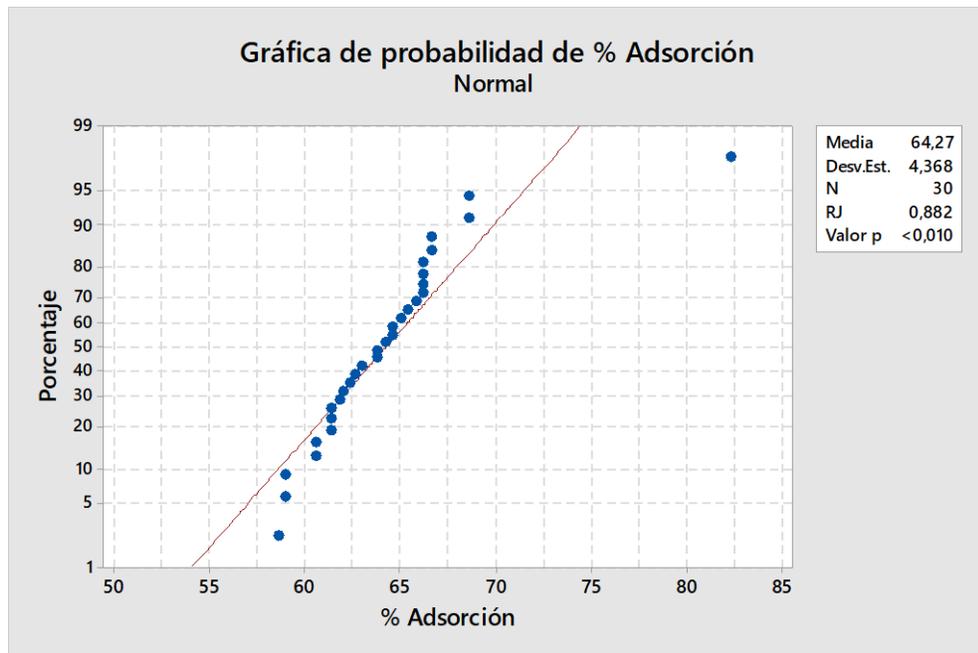


Figura 11 Diagrama prueba de Normalidad Shapiro-Wilk

Para el diseño de Box-Behnken los resultados obtenidos fueron analizados considerando: Diagrama de Pareto, Diagrama Superficie de Respuesta y Diagrama de Probabilidad Normal; según el diagrama de Pareto Figura 12 corrobora que la única interacción que tendría influencia en este proceso es el tamaño de partícula, siendo la única variable que sobre pasa la línea de referencia línea roja (efecto estandarizado), y en el cual la magnitud de esta barra nos brinda la información que tan importante es esta interacción en nuestro proceso de adsorción.

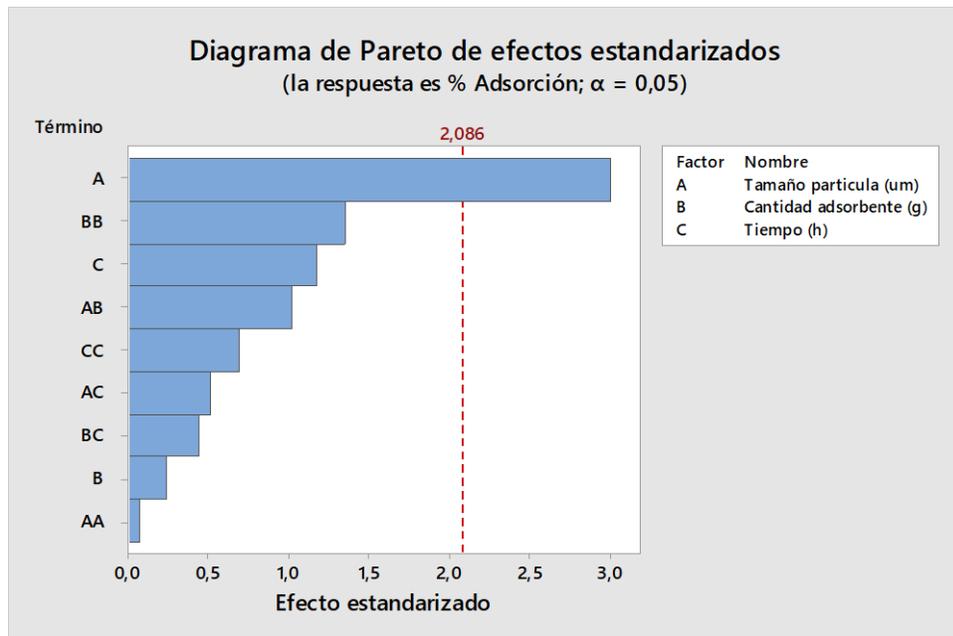


Figura 12 Diagrama Pareto Box-Behnken

En la Figura 13 se observa el grafico de superficie de respuesta en función del tamaño de partícula y la cantidad de adsorbente, en el cual podemos observar que a medida que aumenta el tamaño de partícula también es muy favorable la adsorción de Mg^{2+} en el fique, mientras para la cantidad de adsorbente va a tener su mejor adsorción en el punto medio de esta.

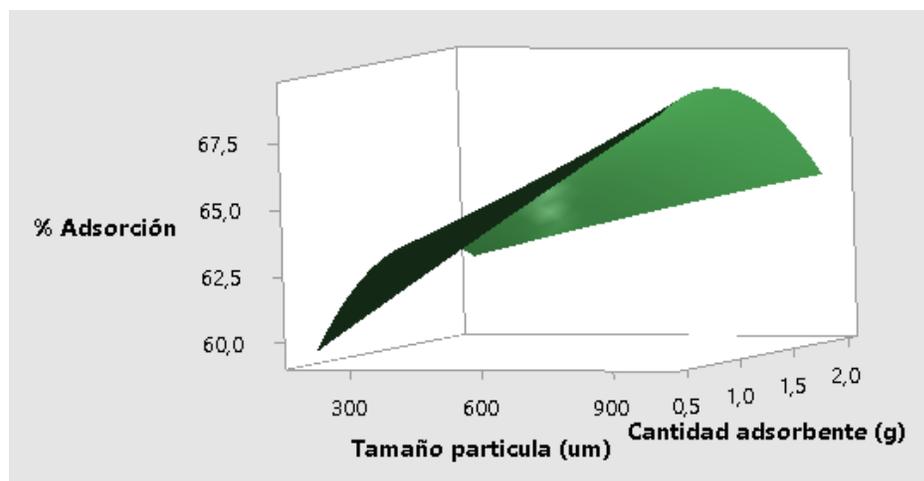


Figura 13 Gráfico superficie de respuesta

Teniendo en cuenta los resultados presentados, se optimizaron los valores de cantidad de adsorbente con 1,0303 g, con un tiempo de 57 minutos y un tamaño de

partícula 1000 μm , dará el mejor porcentaje de adsorción de Mg^{2+} sobre el fique de $54,8 \pm 2,6$.

6.3. Evaluación adsorción Mg^{2+}

6.3.1. Evaluación adsorción tiempo de equilibrio

La determinación del tiempo de equilibrio Figura 14, se evalúa con el porcentaje de adsorción en función del tiempo, donde se alcanzó su máxima adsorción a la hora de contacto entre la fibra de fique y la solución de Mg^{2+} después empieza bajar la adsorción, tiempo que es igual al optimizado por el diseño Box-Behnken con un tiempo de 57 minutos.

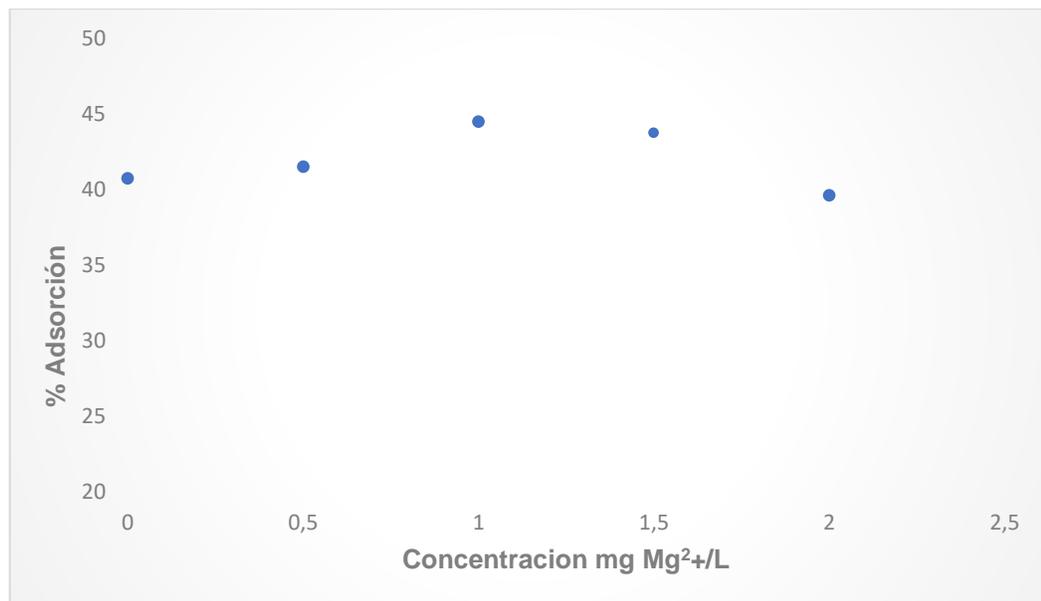


Figura 14 Adsorción Mg^{2+} en fibra de fique a través del tiempo

6.3.2. Evaluación capacidad de adsorción

Se utilizaron soluciones que contenían diferentes concentraciones de Mg^{2+} para evaluar la capacidad de adsorción que tiene la fibra de fique con respecto al metal cuando se alcanza el equilibrio, la concentración de Mg^{2+} oscilo entre 5-45 mg/L Tabla 14.

Tabla 14 Capacidad de adsorción del aserrín de fique a diferentes concentraciones de Mg^{2+}

Concentración Real (mg/L)	(mg Mg^{2+}/L) solución en equilibrio	(mg Mg^{2+}/g) Fique adsorbidos	% Adsorción
4,2	2,942	0,062	29,9
8,4	3,945	0,221	53,0
12,6	4,829	0,385	61,6
16,8	6,275	0,522	62,6
21,0	9,661	0,561	53,9,
25,2	12,310	0,638	51,1
29,4	13,813	0,771	52,9
33,5	17,262	0,811	48,5
37,7	18,283	0,967	51,6
41,9	19,010	1,139	54,7

En la Figura 15 se observa que el más alto porcentaje de adsorción se da a una concentración de 16,8 mg/L de ahí en adelante comienza a fluctuar entre 48,5 y 53,9 el porcentaje de adsorción, ya que los metales tienen diferentes afinidades con los sitios activos del adsorbente, los posibles factores que afectan la adsorción sería el material lignocelulósico, el metal y las condiciones, proceso que podría llevarse a cabo mediante intercambio iónicos, interacción electrostática, formación de complejos, adsorción física. Es muy probable que pueda ocurrir hasta más mecanismos en la adsorción de metales por materiales lignocelulósicos.

También podría atribuirse al efecto que tiene el pH de la solución, ya que si la solución tiene un pH por debajo de 5 hay presencia de iones H^+ lo que podría presentar algunas protonaciones en los grupos presentes en el aserrín de fique disminuyendo los sitios activos y entrenando a competir por ellos lo que no favorece la adsorción de especies catiónicas.

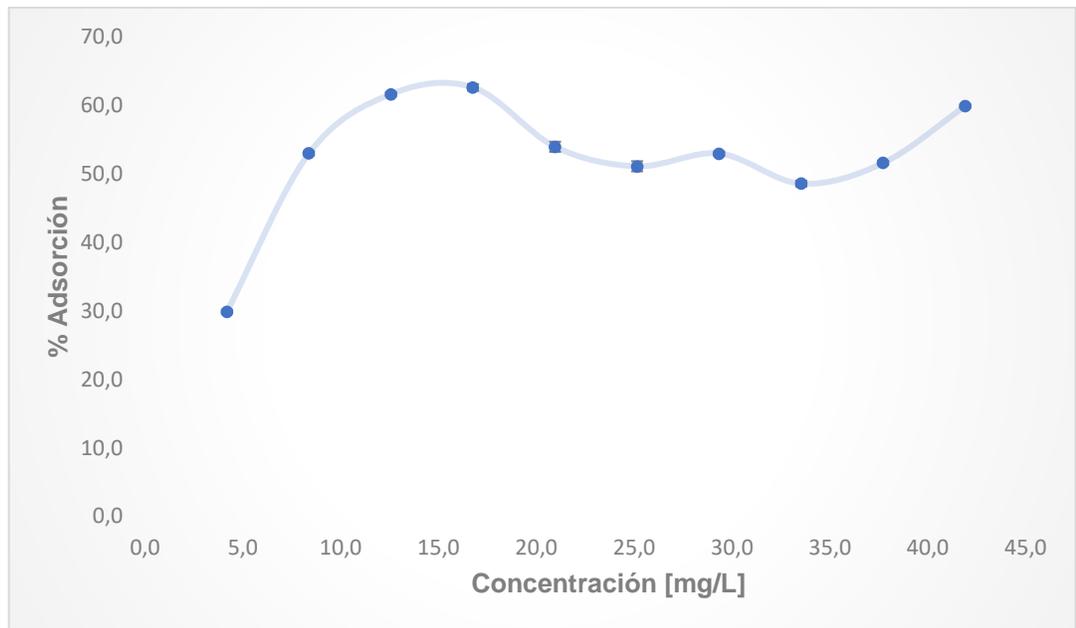


Figura 15 Capacidad de adsorción del aserrín de fique a diferentes concentraciones

6.3.3. Modelos adsorción

De acuerdo con la isoterma de Mg^{2+} Figura 16, se pudo apreciar que ambos modelos matemáticos estudiados representaron mejor el comportamiento de los datos experimentales, lo cual nos indica que la biosorción se puede estar llevando a cabo sobre la superficie del material formando multicapa.

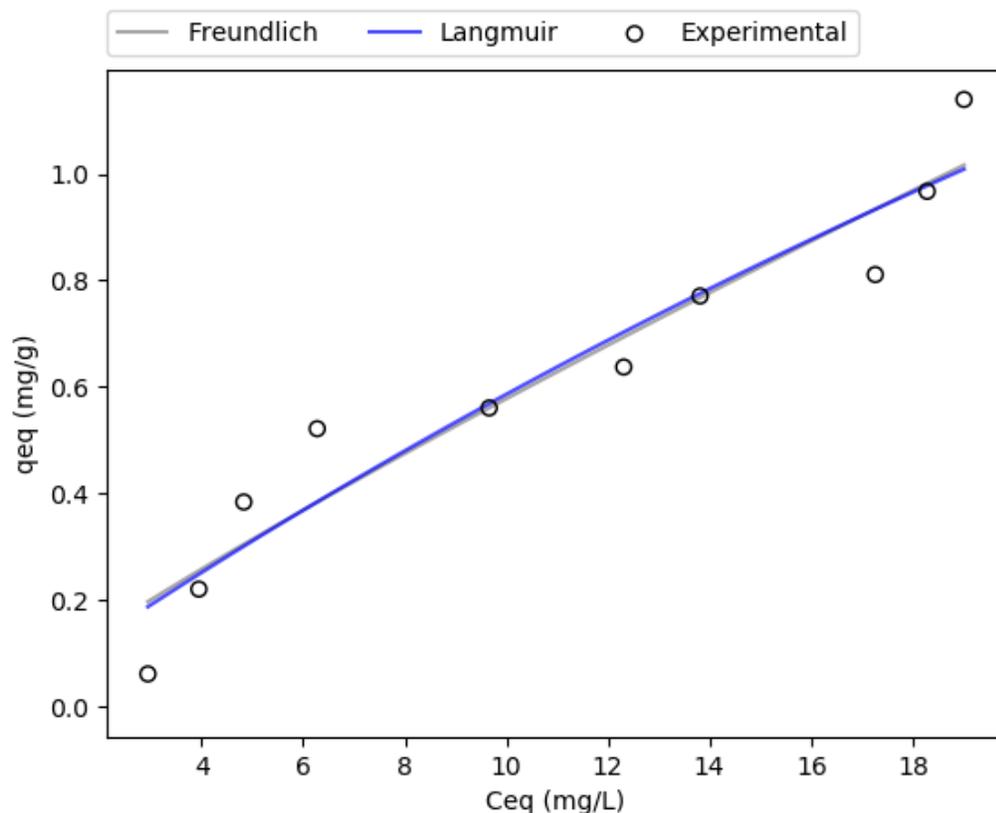


Figura 16 Isotherma de biosorción de Mg^{2+}

En la Tabla 15 se presentan los valores de las constantes de los modelos empleados para describir la isoterma de biosorción de Mg^{2+} , donde se evidencia que, de acuerdo a los coeficientes de determinación, los cuales presentan similares tendencias de adsorción del metal.

Tabla 15 Constantes de los modelos empleados para modelar la isoterma de biosorción de Mg^{2+}

ISOTERMA DE LANGMUIR

r^2	q_L (mg/g)	K_L (L/mg)
0,805	5,01	0,013

ISOTERMA DE FREUNDLICH

r^2	K_F [(mg/g) (L/mg) ^{1/n}]	n
0,806	0,08	1,139

El valor de la constante n del modelo de Freundlich fue de 1,14, lo que indica que la biosorción del metal es favorable, pues si se presentan valores entre 1 y 10 indica una adsorción exponencialmente favorecida en el aserrín de fique y en superficie

heterogénea, por lo tanto, se considera que este modelo es el que mejor describe la biosorción de este metal con una q_{\max} de 5,01 mg/g.

6.3.4. Cinética adsorción

La Figura 17 muestra la representación esquemática de la capacidad de biosorción de la biomasa en función del tiempo de contacto, donde se observa que el modelo de pseudo segundo orden es el que mejor se ajusta a los resultados experimentales.

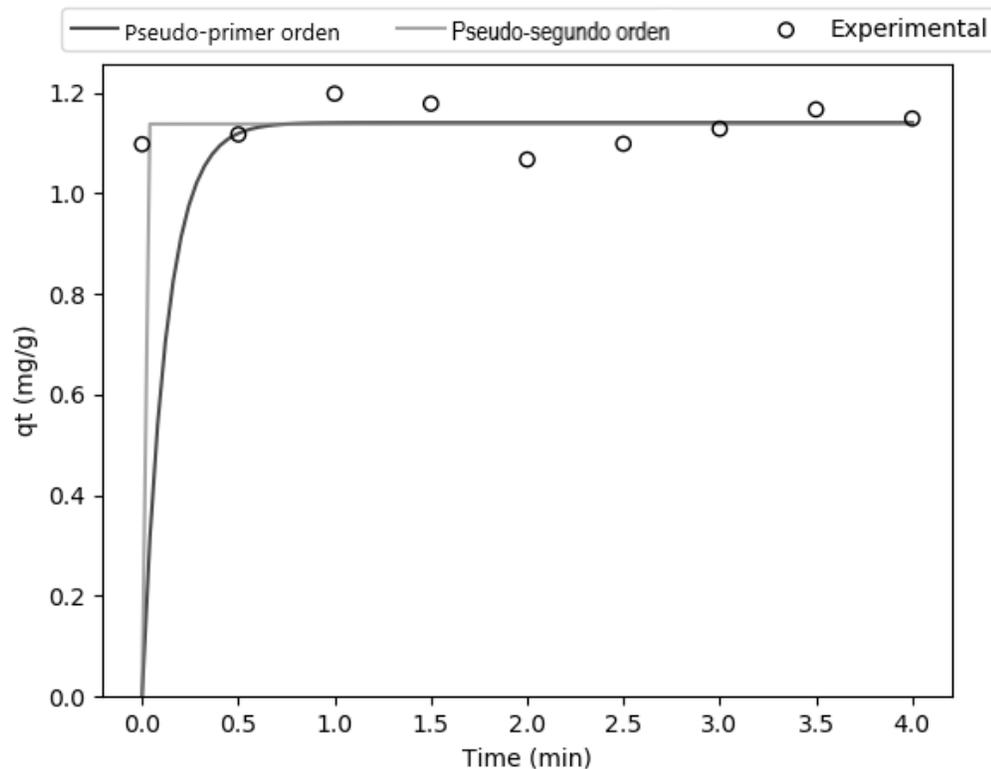


Figura 17 Cinética del proceso de biosorción de Mg^{2+}

En la Tabla 16 se presentan los valores de las constantes de los modelos de pseudo primer orden y pseudo segundo orden empleados para describir la cinética de biosorción de Mg^{2+} , donde se observa que los valores de r^2 para los dos modelos son básicamente iguales, pero en el caso de la constante se observa que la de pseudo segundo orden es mucho mayor, por lo tanto es el modelo que mejor se ajusta para la biosorción de este metal, lo cual indica que a cada ion se le asigna un sitio de adsorción del material biosorbentes y se generan interacciones características de fisorción e interacciones de Van der Waals, donde se llega a un máximo de saturación del metal en la superficie del aserrín de fique y por lo tanto por más cantidad que se adicione el valor que se adsorberá será constante.

Tabla 16 Constantes de los modelos empleados para modelar el modelo cinético de la biosorción de Mg^{2+}

MODELO DE PSEUDO-PRIMER ORDEN		
r^2	q_1 (mg/g)	K_1 (1/min)
0,316	1,14	7,96
MODELO DE PSEUDO-SEGUNDO ORDEN		
r^2	q_2 (mg/g)	K_2 [g/(mg/min)]
0,313	1,14	128040,3

6.3.5. Evaluación adsorción Mg^{2+} y HPO_4^{2-} en el aserrín de fique

Con las variables optimizadas del diseño Box-Behnken para la adsorción de Mg^{2+} , se procedió a realizar ensayos por triplicado con el aserrín de fique para posterior adsorción de HPO_4^{2-} , los resultados obtenidos están consignados en la Tabla 17.

Tabla 17 Porcentajes de adsorción de Mg^{2+} y HPO_4^{2-} en el aserrín de fique

Muestra	% Ads Mg^{2+}	% Ads HPO_4^{2-}
1	54,955	-0-
2	55,832	8,046
3	53,785	4,007

Se puede observar que el porcentaje de adsorción para el Mg^{2+} en las tres muestras es muy similar y por encima del 50% de adsorción, estudios realizados previamente (Parra Reyes, 2022) también en la fibra de fique de altos porcentajes de adsorción de metales en la fibra de fique, lo que nos da la idea de que es un material el cual se puede trabajar en este tipo de adsorciones, teniendo como base el posible uso como biofertilizante esta fibra de fique, y como lo reportan autores sobre la disponibilidad del Mg para la planta es muy baja ya que este elemento se encuentra del 90 al 98% sobre estructuras cristalinas en el suelo, es una alternativa viable suministrarle este elemento con un producto biodegradable, lo que ayudaría a tener un control sobre el suministro de este en el crecimiento de la planta.

En la adsorción del HPO_4^{2-} se observaron resultados diferentes a los obtenidos en Mg^{2+} , pues las adsorciones obtenidas fueron variables obteniendo resultados de 0; 4,007 y 8,046%. Esto permite mostrar la heterogeneidad de la fibra y que la modificación de la misma con Mg^{2+} afecta la adsorción de este nutriente HPO_4^{2-}

respecto a lo reportado por SALAMANCA (Salamanca, 2023) donde se reportaron porcentajes de adsorción entre el 8-13% del nutriente HPO_4^{2-} .

6.4 Modificación del aserrín de fique

En la Tabla 18 encontramos los porcentajes de adsorción de Mg^{2+} y HPO_4^{2-} en las fibras de fique modificadas.

Tabla 18 Porcentajes de adsorción Mg^{2+} y HPO_4^{2-} en el aserrín de fique modificado

Muestra	% Adsorción Mg^{2+}	% Adsorción HPO_4^{2-}
1	78,914	-0-
2	89,317	-0-
3	81,451	-0-

Estudios ya realizados sobre la modificación de la fibra con métodos tanto económicos como amigables con el medio ambiente (solventes), han demostrado que las fibras naturales pueden ser un material útil como biosorbente eficaz.

Después de realizados los experimentos con la fibra de fique sin modificar y modificada, se observa un incremento considerable en el porcentaje de adsorción del Mg^{2+} , en la fibra sin modificar siendo de $54,8 \pm 2,6$ y en la fibra modificada es de $84,2 \pm 13,2$ teniendo un aumento en la adsorción del Mg^{2+} en la fibra modificada, el uso de NaOH en la modificación se usa para alterar la estructura de la celulosa, lo cual cambia la orientación ordenada y cristalina de esta, esto también hace que se generen regiones amorfas en la superficie de la fibra, los grupos hidroxilos -OH sensibles a los álcalis presentes reaccionan, formando O-Na entre las cadenas moleculares de la celulosa (Kabir et al., 2012), el NaOH es un solvente muy usado para realizar este tipo de modificaciones, ya que se puede reducir la capacidad de unión de hidrogeno de celulosa y eliminan los -OH que se unen a la molécula de H_2O (Mohammed et al., 2022; R. Yadav et al., 2023)

Mientras que para el HPO_4^{2-} no se registró adsorción después de la adsorción del Mg^{2+} en la superficie del fique modificada, este trabajo fue presentado en el congreso CLAQ 2022 certificado en ANEXOS.

7. CONCLUSIONES

- Se realiza la caracterización del residuo agroindustrial de fique apoyado en técnicas instrumentales como IR el cual nos da información de los grupos funcionales que van a ser responsables de las interacciones del material adsorbente, se usa la técnica SEM para observar la morfología de esta fibra de fique y se realizaron las pruebas como material adsorbente de Mg^{2+} y HPO_4^{2-} .
- Se empleo el diseño experimental Plackett-Burman y Box-Behnken para optimizar los parámetros más influyentes en la adsorción del Mg^{2+} , teniendo que la cantidad de adsorbente, el tiempo y tamaño de partícula son las variables que tiene una significancia en el proceso de adsorción Mg^{2+} , con un porcentaje de adsorción de $54,8 \pm 2,6$, con un valor de $884,01 \text{ mg } Mg^{2+}/Kg$ de fique y superior al 4% para HPO_4^{2-} , siendo una gran opción el uso de este material para enmiendas de suelos.
- Los residuos de la fibra de fique pueden pasar de ser un posible contaminante a un potencial material de bajo costo con un posible uso en la agricultura como biofertilizante.

8. RECOMENDACIONES

Después de realizados las evaluaciones al material lignocelulósico, tiene un alto potencial de uso para la adsorción de nutrientes, como un posible material de enmienda para recuperar suelos agrícolas, esto por su biodegradabilidad y posible liberación de nutrientes para las plantas; estudios ya realizados demuestran que si se le realiza una modificación a su morfología termina siendo un material de alto porcentaje de adsorción como se evidencio en este trabajo, pero se recomienda realizar experimentos que puedan dar el mejor resultado para este tipo de adsorciones

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A.O, D. (2012). Langmuir, Freundlich, Temkin and Dubinin–Radushkevich Isotherms Studies of Equilibrium Sorption of Zn 2+ Unto Phosphoric Acid Modified Rice Husk. *IOSR Journal of Applied Chemistry*, 3(1), 38–45. <https://doi.org/10.9790/5736-0313845>
- Ajayi, E. O., Akin-Idowu, P. E., Aderibigbe, O. R., Ibitoye, D. O., Afolayan, G., Adewale, O. M., Adesegun, E. A., & Ubi, B. E. (2016). Processing and Properties of Oil Palm Fronds Composite Boards from *Elaeis guineensis*. *Intech*, 11(tourism), 13. <https://www.intechopen.com/books/advanced-biometric-technologies/liveness-detection-in-biometrics>
- Álvarez-palomino, L., Vargas-bayona, J. E., & García-díaz, L. K. (2018). *Abono orgánico : aprovechamiento de los residuos orgánicos agroindustriales*. 1–10.
- Babu, R. S., Prasanna, K., & Kumar, P. S. (2022). A censorious review on the role of natural lignocellulosic fiber waste as a low-cost adsorbent for removal of diverse textile industrial pollutants. *Environmental Research*, 215(P1), 114183. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114183>
- Bajwa, D. S., Pourhashem, G., Ullah, A. H., & Bajwa, S. G. (2019). A concise review of current lignin production, applications, products and their environment impact. *Industrial Crops and Products*, 139(July), 111526. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111526>
- Cao, T. N. D., Mukhtar, H., Le, L. T., Tran, D. P. H., Ngo, M. T. T., Pham, M. D. T., Nguyen, T. B., Vo, T. K. Q., & Bui, X. T. (2023). Roles of microalgae-based biofertilizer in sustainability of green agriculture and food-water-energy security nexus. *Science of the Total Environment*, 870(December 2022), 161927. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161927>
- Carrillo de Cori, C. E., Ruiz Dáger, M., Arrieche, I. E., Aular, L. M., Mora, R., Castillo, L., Noguera, R., Silva, C., Tovar, M. R., Martínez, A., Reverón, A. M., Ortega, B., Belloso, M., León, R. M., & Fernández, S. (2014). Cuantificación de calcio y magnesio por espectrofotometría de absorción atómica en fertilizantes . *Venesuelos*, 22(January), 31–39.
- Carro de Diego, L. (2012). Eliminación de mercurio de efluentes acuosos con materiales de bajo coste: proceso combinado de bioadsorción-reducucción. *A Coruña, Univerdade Da Coruña.*, Tesis doctoral.
- Castellanos, L. J., Blanco-Tirado, C., Hinestroza, J. P., & Combariza, M. Y. (2012). In situ synthesis of gold nanoparticles using fique natural fibers as template. *Cellulose*, 19(6), 1933–1943. <https://doi.org/10.1007/s10570-012-9763-8>
- Cedeño Zambrano, J. R., García Párraga, J. V., Solórzano Cobeña, C. M., Jiménez-Flores, L. A. J., Ulloa Cortazar, S. M., López-Mejía, F. X., Avellán Vásquez, L. E., Bracho Bravo, B. Y., & Sánchez Urdaneta, A. B. (2021). Fertilización Fertilización con magnesio en plátano ‘Barraganete’ (Musa AAB) Ecuador. *La Granja*, 35(1), 8–19. <https://doi.org/10.17163/lgr.n35.2022.01>
- Chakraborty, R., Mukhopadhyay, A., Paul, S., Sarkar, S., & Mukhopadhyay, R. (2023). Nanocomposite-based smart fertilizers: A boon to agricultural and

- environmental sustainability. *Science of the Total Environment*, 863(November 2022), 160859. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160859>
- Chen, S., Yang, M., Ba, C., Yu, S., Jiang, Y., Zou, H., & Zhang, Y. (2018). Preparation and characterization of slow-release fertilizer encapsulated by biochar-based waterborne copolymers. *Science of the Total Environment*, 615, 431–437. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.209>
- Chojnacka, K. (2010). Biosorption and bioaccumulation - the prospects for practical applications. *Environment International*, 36(3), 299–307. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2009.12.001>
- Dias, F. de S., Meira, L. A., Carneiro, C. N., dos Santos, L. F. M., Guimarães, L. B., Coelho, N. M. M., Coelho, L. M., & Alves, V. N. (2023). Lignocellulosic materials as adsorbents in solid phase extraction for trace elements preconcentration. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*, 158. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2022.116891>
- Díaz, V. C., & Sadeghian, S. (2018). Adsorción de fósforo en suelos de la zona cafetera de Colombia. *Cenicafé*, 69(2), 7–16.
- Duan, Q., Jiang, S., Chen, F., Li, Z., Ma, L., Song, Y., Yu, X., Chen, Y., Liu, H., & Yu, L. (2023). Fabrication, evaluation methodologies and models of slow-release fertilizers: A review. *Industrial Crops and Products*, 192(November 2022), 116075. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.116075>
- Echeverry Echeverry, R. D., Franco Montoya, L. M., & Gonzáles Velásquez, M. R. (2015). *Fique en Colombia*. Fique En Colombia. <https://fondoeditorial.itm.edu.co/libros-electronicos/Fique-en-colombia/mobile/index.html#p=4>
- Estrada, R. G., Santiuste, C., & Barbero, E. (2021). Failure maps of biocomposites mechanical joints reinforced with natural fibres. *Composites Part C: Open Access*, 5(May), 100159. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100159>
- Farooq, U., Kozinski, J. A., Khan, M. A., & Athar, M. (2010). Biosorption of heavy metal ions using wheat based biosorbents - A review of the recent literature. *Bioresource Technology*, 101(14), 5043–5053. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.02.030>
- Faruk, O., Bledzki, A. K., Fink, H. P., & Sain, M. (2012). Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010. *Progress in Polymer Science*, 37(11), 1552–1596. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003>
- Figuerola, D., Moreno, A., & Angelina, A. (2015). Equilibrio, termodinámica y modelos cinéticos en la adsorción de Rojo 40 sobre tuza de maíz. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 14(26), 105–120. <https://doi.org/10.22395/rium.v14n26a7>
- Ghodsad, L., Reyhanitabar, A., Oustan, S., & Alidohkt, L. (2022). Phosphorus sorption and desorption characteristics of soils as affected by biochar. *Soil and Tillage Research*, 216(April 2020), 105251. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105251>
- Girelli, A. M., & Chiappini, V. (2023). Renewable, sustainable, and natural lignocellulosic carriers for lipase immobilization: A review. *Journal of Biotechnology*, 365(October 2022), 29–47.

- <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2023.02.003>
- Gómez Hoyos, C., Alvarez, V. A., Rojo, P. G., & Vázquez, A. (2012). Figue fibers: Enhancement of the tensile strength of alkali treated fibers during tensile load application. *Fibers and Polymers*, 13(5), 632–640.
<https://doi.org/10.1007/s12221-012-0632-8>
- Grisales-Cifuentes, C. M., Serna Galvis, E. A., Porras, J., Flórez, E., Torres-Palma, R. A., & Acelas, N. (2021). Kinetics, isotherms, effect of structure, and computational analysis during the removal of three representative pharmaceuticals from water by adsorption using a biochar obtained from oil palm fiber. *Bioresource Technology*, 326(January).
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124753>
- Hu, Y., Tang, L., Lu, Q., Wang, S., Chen, X., & Huang, B. (2014). Preparation of cellulose nanocrystals and carboxylated cellulose nanocrystals from borer powder of bamboo. *Cellulose*, 21(3), 1611–1618.
<https://doi.org/10.1007/s10570-014-0236-0>
- Iskalieva, A., Yimmou, B. M., Gogate, P. R., Horvath, M., Horvath, P. G., & Csoka, L. (2012). Cavitation assisted delignification of wheat straw: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 19(5), 984–993.
<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2012.02.007>
- Izquierdo, M. (2010). Eliminación de metales pesados en aguas mediante bioadsorción, evaluación de materiales y modelación del proceso. In *TDX (Tesis Doctorals en Xarxa)*. <http://www.tdx.cat/handle/10803/52130>
- John, M. J., & Thomas, S. (2008). Biofibres and biocomposites. *Carbohydrate Polymers*, 71(3), 343–364. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2007.05.040>
- Johnston, A. E., Poulton, P. R., Fixen, P. E., & Curtin, D. (2014). Phosphorus. Its Efficient Use in Agriculture. In *Advances in Agronomy* (1st ed., Vol. 123). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-420225-2.00005-4>
- Kabir, M. M., Wang, H., Lau, K. T., & Cardona, F. (2012). Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview. *Composites Part B: Engineering*, 43(7), 2883–2892.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.04.053>
- Karim, F.-E.-, Islam, M. R., Ahmed, R., Siddique, A. B., & Begum, H. A. (2023). Extraction and characterization of a newly developed cellulose enriched sustainable natural fiber from the epidermis of Mikania micrantha. *Heliyon*, 9(9), e19360. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19360>
- Karimah, A., Ridho, M. R., Munawar, S. S., Adi, D. S., Ismadi, Damayanti, R., Subiyanto, B., Fatriasari, W., & Fudholi, A. (2021). A review on natural fibers for development of eco-friendly bio-composite: characteristics, and utilizations. *Journal of Materials Research and Technology*, 13, 2442–2458.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.06.014>
- Khan, H. A., Naqvi, S. R., Mehran, M. T., Khoja, A. H., Khan Niazi, M. B., Juchelková, D., & Atabani, A. (2021). A performance evaluation study of nano-biochar as a potential slow-release nano-fertilizer from wheat straw residue for sustainable agriculture. *Chemosphere*, 285(June).
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131382>

- Laverde, V., Marin, A., Benjumea, J. M., & Rincón Ortiz, M. (2022). Use of vegetable fibers as reinforcements in cement-matrix composite materials: A review. *Construction and Building Materials*, 340(July 2021). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127729>
- LI, C., KUYPER, T. W., VAN DER WERF, W., ZHANG, J., LI, H., ZHANG, F., & HOFLLAND, E. (2022). A conceptual framework and an empirical test of complementarity and facilitation with respect to phosphorous uptake by plant species mixtures. *Pedosphere*, 32(2), 317–329. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(21\)60076-0](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(21)60076-0)
- López, L., Sarmiento, A., Fajardo, J., Valarezo, L., & Gallego, R. (2013). *Determinación del porcentaje de humedad, solubles e insolubles en agua de la fibra de Carludovica Palmata (paja toquilla)*. 23–27.
- Manimaran, P., Senthamaraiannan, P., Sanjay, M. R., Marichelvam, M. K., & Jawaid, M. (2018). Study on characterization of Furcraea foetida new natural fiber as composite reinforcement for lightweight applications. *Carbohydrate Polymers*, 181(July 2017), 650–658. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.11.099>
- Mendoza, C. M. (2022). *Revista Colón Ciencias , Tecnología y Negocios*. 9(li), 81–96.
- Miller, J. N., & Miller, J. M. (2002). Estadística y quimiometría para química analítica. In *Editorial Prentice Hall*, (p. 296). <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Estad?stica+Y+Quimiometr?a+para+Qu?mica+Anal?tica#0%5Cnhttp://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Estad?stica+y+quimiometr?a+para+qu?mica+anal?tica#0>
- Mngomezulu, M. E., John, M. J., Jacobs, V., & Luyt, A. S. (2014). Review on flammability of biofibres and biocomposites. *Carbohydrate Polymers*, 111, 149–182. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.03.071>
- Mohammed, M., Rahman, R., Mohammed, A. M., Adam, T., Betar, B. O., Osman, A. F., & Dahham, O. S. (2022). Surface treatment to improve water repellence and compatibility of natural fiber with polymer matrix: Recent advancement. *Polymer Testing*, 115(July), 107707. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107707>
- Morán, J. I., Alvarez, V. A., Cyras, V. P., & Vázquez, A. (2008). Extraction of cellulose and preparation of nanocellulose from sisal fibers. *Cellulose*, 15(1), 149–159. <https://doi.org/10.1007/s10570-007-9145-9>
- Operato, L., Vitiello, L., Aprea, P., Ambrogi, V., Salzano de Luna, M., & Filippone, G. (2023). Life cycle assessment of poly(lactic acid)-based green composites filled with pine needles or kenaf fibers. *Journal of Cleaner Production*, 387(December 2022), 135901. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.135901>
- Pacheco, A. L. V., Pagliarini, M. F., de Freitas, G. B., Santos, R. H. S., Serrão, J. E., & Zanuncio, J. C. (2017). Mineral composition of pulp and production of the yellow passion fruit with organic and conventional fertilizers. *Food Chemistry*, 217, 425–430. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.08.068>
- Parameswaranpillai, J., Gopi, J. A., Radoor, S., C. D., M. D., Krishnasamy, S.,

- Deshmukh, K., Hameed, N., Salim, N. V., & Sienkiewicz, N. (2023). Turning waste plant fibers into advanced plant fiber reinforced polymer composites: A comprehensive review. *Composites Part C: Open Access*, 10(December 2022), 100333. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2022.100333>
- Parra Reyes, J. A. (2022). *Evaluación de la capacidad de adsorción del residuo de fique (Furcraea sp.) para la remoción de metales pesados (Cr, Pb, Hg) en aguas*. Tesis maestría.
- Rudi, N. N., Muhamad, M. S., Te Chuan, L., Alipal, J., Omar, S., Hamidon, N., Abdul Hamid, N. H., Mohamed Sunar, N., Ali, R., & Harun, H. (2020). Evolution of adsorption process for manganese removal in water via agricultural waste adsorbents. *Heliyon*, 6(9), e05049. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05049>
- Salamanca, D. A. (2023). *Adsorción de Fósforo en residuos agroindustriales de fique*. July, Tesis pregrado.
- Salasinska, K., Polka, M., Gloc, M., & Ryszkowska, J. (2016). Natural fiber composites: The effect of the kind and content of filler on the dimensional and fire stability of polyolefin-based composites. *Polimery/Polymers*, 61(4), 255–265. <https://doi.org/10.14314/polimery.2016.255>
- Sharma, M., Sharma, R., & Chandra Sharma, S. (2020). A review on fibres and fillers on improving the mechanical behaviour of fibre reinforced polymer composites. *Materials Today: Proceedings*, 46, 6482–6489. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.667>
- Sheeba, K. R. J., Alagarasan, J. K., Dharmaraja, J., Kavitha, S. A., Shobana, S., Arvindnarayan, S., Vadivel, M., Lee, M., & Retnam, K. P. (2023). Physico-chemical and extraction properties on alkali-treated *Acacia pennata* fiber. *Environmental Research*, 233(October 2022). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116415>
- Sreenivasan, V. S., Somasundaram, S., Ravindran, D., Manikandan, V., & Narayanasamy, R. (2011). Microstructural, physico-chemical and mechanical characterisation of *Sansevieria cylindrica* fibres – An exploratory investigation. *Materials and Design*, 32(1), 453–461. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.06.004>
- Vargas Corredor, Y. A., & Pérez Pérez, L. I. (2018). Use of agro-industrial waste in improving the quality of the environment. *Revista de La Facultad de Ciencias Básicas*, 14(1), 59–72. <http://dx.doi.org/10.18359/rfcb.xxxx>
- Vejan, P., Khadiran, T., Abdullah, R., & Ahmad, N. (2021). Controlled release fertilizer: A review on developments, applications and potential in agriculture. *Journal of Controlled Release*, 339(May), 321–334. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2021.10.003>
- Wang, C., Luo, D., Zhang, X., Huang, R., Cao, Y., Liu, G., Zhang, Y., & Wang, H. (2022). Biochar-based slow-release of fertilizers for sustainable agriculture: A mini review. *Environmental Science and Ecotechnology*, 10, 100167. <https://doi.org/10.1016/j.ese.2022.100167>
- Wang, G., George, T. S., Pan, Q., Feng, G., & Zhang, L. (2022). Two isolates of *Rhizophagus irregularis* select different strategies for improving plants

- phosphorus uptake at moderate soil P availability. *Geoderma*, 421(May), 115910. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115910>
- Watkins, D., Nuruddin, M., Hosur, M., Tcherbi-Narteh, A., & Jeelani, S. (2015). Extraction and characterization of lignin from different biomass resources. *Journal of Materials Research and Technology*, 4(1), 26–32. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2014.10.009>
- Yadav, A., Sharma, V., Tsai, M. L., Chen, C. W., Sun, P. P., Nargotra, P., Wang, J. X., & Dong, C. Di. (2023). Development of lignocellulosic biorefineries for the sustainable production of biofuels: Towards circular bioeconomy. *Bioresource Technology*, 381, 129145. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129145>
- Yadav, R., Zabihi, O., Fakhrhoseini, S., Nazarloo, H. A., Kiziltas, A., Blanchard, P., & Naebe, M. (2023). Lignin derived carbon fiber and nanofiber: Manufacturing and applications. *Composites Part B: Engineering*, 255, 110613. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.110613>
- Yang, J., Xin, X., Zhong, X., Yang, W., Zhang, X., Ding, S., Ren, G., & Zhu, A. (2023). The fate of fertilizer-derived phosphorus under different long-term fertilization regimes: A phosphate oxygen isotope study. *Science of the Total Environment*, 856(October 2022), 159263. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159263>

ANEXOS



Certificado

Certificamos que *Fuli Arcos, J.H.; Perez, E.H.; Salamanca Santiago, D.A.; Parra Reyes, J.A.* apresentou(aram) o trabalho "PROCESOS DE ADSORCIÓN EN RESIDUO AGROINDUSTRIAL DE FIQUE CON MAGNESIO Y FÓSFORO COMO POSIBLE USO DE BIOFERTILIZANTE" no *35º Congresso Latinoamericano de Química e 61º Congresso Brasileiro de Química*, realizados de 14 a 18 de Novembro de 2022, no Centro de Eventos do Windsor Flórida Hotel, na cidade do Rio de Janeiro, Brasil.

Rio de Janeiro, 18 de Novembro de 2022.

Jorge Cardoso Messeder
Presidente do 35º CLAQ

Florinda do Nascimento Cersósimo
Presidente do 61º CBQ