



**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA ECOTEC  
FACULTAD DE INGENIERIAS, ARQUITECTURA Y CIENCIAS DE  
LA NATURALEZA**

**CARRERA DE AGRONOMÍA**

**TRABAJO INVESTIGACIÓN**

**VALORIZACIÓN DE RESIDUOS OBTENIDOS A PARTIR  
DE LA SIEMBRA DE ARROZ Y SU USO COMO  
ADSORBENTE DE COLORANTES**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN  
GESTIÓN DE LOS PROCESOS PRODUCTIVOS AGRÍCOLAS**

**AUTOR  
CARLOS ANTONIO CAMBA PÉREZ**

**SAMBORONDÓN – ECUADOR**

**2024**



**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA ECOTEC  
FACULTAD DE INGENIERIAS, ARQUITECTURA Y  
CIENCIAS DE LA NATURALEZA**

**CARRERA DE AGRONOMÍA**

**VALORIZACIÓN DE RESIDUOS OBTENIDOS A PARTIR  
DE LA SIEMBRA DE ARROZ Y SU USO COMO  
ADSORBENTE DE COLORANTES  
TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**

**Trabajo de titulación presentado como requisito para la obtención  
del título de  
INGENIERO AGRÓNOMO**

**AUTOR  
CARLOS ANTONIO CAMBA PÉREZ**

**TUTOR  
DR. CÉSAR ALCÁCER SANTOS**

**SAMBORONDÓN – ECUADOR**

**2024**

## ANEXO No. 10

**PROCESO DE TITULACIÓN  
CERTIFICADO DEL PORCENTAJE DE COINCIDENCIAS  
DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Habiendo sido revisado el trabajo de titulación TITULADO: **Valorización de residuos obtenidos a partir de la siembra de arroz y su uso como absorbente de colorantes** elaborado por **CARLOS ANTONIO CAMBA PEREZ** fue remitido al sistema de coincidencias en todo su contenido el mismo que presentó un porcentaje del **8%**, mismo que cumple con el valor aceptado para su presentación que es inferior o igual al 10% sobre el total de hojas del documento. Adicional se adjunta captura de pantalla de dicho resultado.



**CERTIFICADO DE ANÁLISIS**  
magister

**CAMBA PÉREZ CARLOS ANTONIO**  
**\_TFC\_19DIC2024**

**8%**  
Textos sospechosos

**4%** Similitudes  
0% similitudes entre comillas  
2% entre las fuentes mencionadas  
**4%** Idiomas no reconocidos

Nombre del documento: CAMBA PÉREZ CARLOS ANTONIO _TFC_19DIC2024.pdf ID del documento: 7910fdd69844e30912a4e15a7989422e3539af4c Tamaño del documento original: 1,79 MB Autores: []	Depositante: CESAR ALCACER SANTOS Fecha de depósito: 17/12/2024 Tipo de carga: interface fecha de fin de análisis: 17/12/2024	Número de palabras: 11.171 Número de caracteres: 79.445
--	--	--

**ATENTAMENTE,**



Firmado electrónicamente por:  
**CESAR ALCACER  
SANTOS**

César Alcácer Santos, Ph.D.

18 de diciembre de 2024

**ANEXO No. 12**

**CERTIFICADO DE APROBACIÓN DEL TUTOR PARA LA PRESENTACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN CON INCORPORACIÓN DE LAS OBSERVACIONES DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL**

Samborondón, 18 de diciembre de 2024

Magíster

**Érika Ascencio Jordán**

**Facultad de Ingenierías, Arquitectura y Ciencias de la Naturaleza**

Universidad Tecnológica ECOTEC

De mis consideraciones:

Por medio de la presente comunico a usted que el trabajo de titulación TITULADO: **Valorización de residuos obtenidos a partir de la siembra de arroz y su uso como absorbente de colorantes**; fue revisado y se deja constancia que el estudiante acogió e incorporó todas las observaciones realizadas por los miembros del tribunal de sustentación por lo que se autoriza a: **CAMBA PEREZ CARLOS ANTONIO** , para que proceda a la presentación del trabajo de titulación para la revisión de los miembros del tribunal de sustentación y posterior sustentación.

**ATENTAMENTE,**



Firmado electrónicamente por:  
**CESAR ALCACER  
SANTOS**

**PhD. César Alcácer Santos**

**Tutor**

## **Dedicatoria**

A mi familia, por ser mi mayor fuente de inspiración y apoyo incondicional. A mi madre y mi padre, cuyo amor, esfuerzo y sacrificio me han guiado hasta este momento; a mi abuela y Tío, por sus palabras de sabiduría y su fe en mis capacidades; y a Ana, por ser mi compañera en cada paso de este camino, brindándome su paciencia y aliento.

## **Agradecimiento**

Agradezco profundamente a mi familia por el apoyo incondicional que me ha brindado a lo largo de mi formación profesional. En especial, quiero agradecer a mi mamá, mi papá, mi tío, mi abuelita y mi novia, quienes han sido pilares fundamentales para alcanzar esta meta.

Extiendo también mi gratitud a todos los profesores que han contribuido a mi desarrollo académico, especialmente a la Miss Marianela, al Míster Kelvin, al Míster Panchito y al Dr. Luque, quienes me ofrecieron valiosas oportunidades para adquirir nuevos conocimientos en el área de investigación.

Finalmente, agradezco a mis amigos Joel, Génesis, Jorge, Melissa, Óscar, Viviana, Goya, Molly, Jardel, María, Carlos y Anthony, por estar a mi lado en cada paso del camino y brindarme su apoyo constante durante todo este proceso.

## Resumen

La creciente demanda de soluciones sostenibles y la problemática de la contaminación industrial motivan la búsqueda de métodos eficientes para la gestión de residuos agrícolas. La cascarilla de arroz, residuo comúnmente desaprovechado, representa una oportunidad para la reducción de contaminantes en aguas residuales, especialmente colorantes de origen textil. En este estudio, se evaluó la capacidad de adsorción de sílice obtenida de cascarilla de arroz mediante extracción mecanoquímica. Se realizaron pruebas de adsorción de azul de metileno a diferentes concentraciones de sílice y colorante, y el material fue caracterizado mediante técnicas como FTIR para determinar su composición y propiedades funcionales. Los resultados muestran que la sílice derivada de la cascarilla de arroz es altamente eficaz en la remoción de colorantes, especialmente en concentraciones óptimas. Este hallazgo sugiere que el uso de subproductos agrícolas en el tratamiento de aguas residuales es una alternativa viable y económica, con potencial para reducir el impacto ambiental de los residuos industriales y contribuir a la sostenibilidad.

**Palabras clave:** adsorción, cascarilla de arroz, colorantes, residuos agrícolas, sílice

## Abstract

The growing demand for sustainable solutions and the issue of industrial pollution drive the search for efficient methods for agricultural waste management. Rice husk, a commonly underutilized byproduct, represents an opportunity for reducing contaminants in wastewater, especially dyes from textile origins. This study evaluated the adsorption capacity of silica obtained from rice husk through mechanochemical extraction. Adsorption tests with methylene blue were conducted at different concentrations of silica and dye, and the material was characterized using techniques such as FTIR to determine its composition and functional properties. Results show that silica derived from rice husk is highly effective in dye removal, particularly at optimal concentrations. This finding suggests that using agricultural byproducts in wastewater treatment is a viable and economical alternative, with the potential to reduce the environmental impact of industrial waste and contribute to sustainability.

**Keywords:** adsorption, rice husk, dyes, agricultural waste, silica

## Tabla de Contenidos

Resumen .....	iii
Abstract.....	iv
LISTA DE FIGURAS.....	viii
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN.....	1
Introducción.....	1
Identificación del problema.....	2
Limitaciones del trabajo.....	3
Justificación y Objetivos.....	3
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.....	6
Bases teóricas .....	6
El arroz como uno de los principales alimentos consumidos en el mundo.....	6
Generación de residuos en la producción arroceras.....	7
Problemática del manejo de residuos Agrícolas.....	7
Efectos Ambientales de la quema de paja y cascarilla.....	8
Propiedades físico – química de la paja y cascarilla del arroz.....	8
Revalorización de Residuos del cultivo de arroz como estrategia sostenible.....	9
Uso de los residuos del arroz para la producción de biogás.....	10
Reutilización de los desechos del cultivo de arroz como materiales de construcción.....	11
Abonos agrícolas creados con biomasa de arroz.....	11
Estructura y Propiedades de la sílice extraída de la cascarilla de arroz.....	12
Uso de la sílice en la adsorción de contaminantes .....	13

Extracción de Sílice mediante Pirolisis .....	14
Extracción de Sílice mediante Combustión Controlada.....	14
Extracción de Sílice mediante un Tratamiento Ácido.....	15
Extracción de Sílice mediante Mecanoquímica .....	15
Problemática de la contaminación de masas de agua por vertidos de colorantes .....	16
Efectos causados por los vertidos de colorantes en la vida acuática .....	17
Adsorción de colorantes como solución de bajo costo .....	17
Estado del Arte .....	18
<b>CAPÍTULO 3: MARCO METODOLÓGICO .....</b>	<b>20</b>
Introducción a la metodología utilizada .....	20
Materiales y métodos del objetivo específico 1.....	20
Materiales y métodos del objetivo específico 2.....	21
Materiales y métodos del objetivo específico 3.....	24
<b>Capítulo 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>25</b>
Introducción a los resultados.....	25
Resultados del objetivo específico 1.....	25
Resultados del objetivo específico 2.....	28
Discusión .....	30
<b>Capítulo 5: CONCLUSIONES .....</b>	<b>32</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>33</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>42</b>
Anexo A: Documentación gráfica .....	42



**LISTA DE FIGURAS**

<b>Figura.1</b> Demanda mundial de cereales para el 2030 (OECD/FAO, 2021). .....	6
<b>Figura. 2</b> Diagrama de la elaboración de la sílice a partir de la cascarilla de arroz (elaboración propia).....	21
<b>Figura.3</b> (A) Espectro FTIR de la sílice obtenida de la cascarilla de arroz después de ser sometida por un proceso químico (elaboración propia), (B) sílice obtenida por (Villota-Enríquez & Rodríguez-Páez, 2023).....	26
<b>Figura.4</b> Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) de la sílice obtenida de la cascarilla de arroz (Villota-Enríquez & Rodríguez-Páez, 2023).....	27
<b>Figura.5</b> Reducción de la concentración de azul de metileno utilizando diferentes concentraciones de sílice (elaboración propia).....	28
<b>Figura.6</b> Dosificación óptima de sílice según la concentración de azul metileno (elaboración propia).....	30
<b>Figura 7.</b> Muestras con distintas concentraciones de azul metileno para crear la curva de nivel en el cromatógrafo .....	42
<b>Figura 8.</b> Proceso de adsorción de azul metileno con distintas concentraciones de sílice. ....	43
<b>Figura 9.</b> Resultados de la adsorción de distintas concentraciones de azul metileno..	44

## CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN

### Introducción

La población humana se ha ido incrementando constantemente y se estima que para el año 2050 va a ver un aumento mundial de 9.600 millones de habitantes (Tripathi et al., 2019), requiriendo un aumento del 70% en la producción de alimentos (Morchid et al., 2024). Este escenario plantea importantes desafíos para garantizar la seguridad alimentaria a nivel global. El incremento en la demanda de alimentos ha llevado al sector agrícola a adoptar métodos innovadores como la agricultura de precisión, optimizando los recursos naturales, humanos y mecánicos, reduciendo el impacto medioambiental y aumentando la producción de los productos de interés. (Petrović et al., 2024).

Dentro de los productos agrícolas más consumido en Ecuador y a nivel mundial es el arroz (*Oryza sativa L.*), con una producción de 721.3 millones de toneladas en el año 2022/23 (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2024; Tan et al., 2023). Aunque en la producción no solo se obtiene el producto de interés si no también subproductos en la postcosecha que representan una cantidad significativa, siendo estos: la paja y la cascarilla, estos subproductos son pocamente aprovechados en alimento para animales o abonos orgánicos, mayormente son desechados o quemados emitiendo grandes cantidades de CO<sub>2</sub> que es el principal causante del efecto invernadero(Chen et al., 2021; Romero-Ocaña et al., 2022)

Existen diversos enfoques que buscan revalorizar este subproducto como el biocombustible, materiales de construcción, abonos agrícolas y productos químicos. (Gupte et al., 2022; Nzereogu et al., 2023; Shi et al., 2024; R. Wang et al., 2024). Siendo este último un enfoque muy atractivo con la extracción de sílice ya que exhibe una concentración de 5 a 20% y también por sus propiedades físicas y químicas que posee, pudiéndose extraer y utilizar en la

creación de diferentes productos otorgándole un valor añadido (Ginting et al., 2022; Z. Wang et al., 2023).

Hay varios métodos para extraer la sílice de la cascarilla de arroz como la pirolisis, combustión controlada, extracción ácida, entre otros, estos métodos presentan desafíos como el alto consumo energético y costos elevados (Fernandes et al., 2024; Shen et al., 2014; Steven et al., 2021; Yadav et al., 2022).

En respuesta, enfoques innovadores como el desarrollo mecanoquímico propuesto por Luque et al. (2018) ofrecen soluciones prometedoras, permitiendo la obtención de sílice de la cascarilla de arroz. Es por eso, por lo que esta investigación se centra en evaluar la eficiencia en la obtención de productos de mayor valor añadido a partir de residuos de la siembra de arroz y su aplicación en la adsorción de colorantes.

### **Identificación del problema**

En la actualidad, el cultivo de arroz produce una cantidad significativa de residuos agrícolas, tales como la paja y la cascarilla que suelen ser quemados siendo el factor principal para el efecto invernadero y otros compuestos que son dirigidos al aire como el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), entre otros (Dutta et al., 2022).

Paralelamente, se considera que las industrias textiles son una de las más contaminantes del mundo con un 17 – 20% en el proceso de teñido, siendo la causa principal de contaminación del agua, disminuyendo el oxígeno disuelto que es esencial para los seres vivos y microorganismos (Rendón-Castrillón et al., 2024).

Con el avanzar de los tiempos, se han desarrollado diferentes soluciones sostenibles que buscan aprovechar el potencial de los residuos agroindustriales y ser transformados en materiales con un valor agregado. Una de las áreas de interés es la extracción de sílice de la cascarilla de arroz y su uso como adsorbente natural para la remoción de colorantes. No obstante, existen desafíos técnicos como científicos que se deben abordar para optimizar su

aplicación, efectividad del material con diferentes concentraciones de colorantes y su capacidad de adsorción.

### **Limitaciones del trabajo**

El desarrollo y revalorización de los residuos es un tema en constante evolución, impulsado recientemente por la creciente contaminación y la necesidad de reducir los desechos en el medio ambiente. Debido a esto, el alto costo de la investigación y el equilibrio entre productos rentables es difícil de alcanzar para los pequeños productores, quienes buscan metodologías que añadan valor a estos recursos con un elevado impacto ambiental.

### **Justificación y Objetivos**

El manejo inadecuado de los residuos del cultivo de arroz, como la quema, representa una seria amenaza generando problemas ambientales significativos, esta técnica es utilizada para despejar los campos y contribuye significativamente en el aumento de los gases de efecto invernadero, por otra parte, las empresas textiles se encuentran como uno de los principales motivos de la contaminación debido al vertido de colorantes a las fuentes hídricas provocando la alteración de la calidad del agua, afectando a la vida silvestre como a su vez a las comunidades humanas.

La emergencia de esta investigación radica en abordar la contaminación hídrica por colorantes y la gestión insostenible de los residuos agrícolas, resaltando la necesidad de soluciones que ayuden en la protección ambiental como a la innovación de productos químicos a partir de la gestión de residuos.

Esta investigación es viable ya que dispone con los recursos necesarios para su elaboración, por ejemplo: equipos de laboratorio, materiales y fuentes de investigación, para llevarla a cabo.

La presente investigación beneficia a la sociedad tanto en las áreas urbanas como rurales, ya que otorga valor a una biomasa que actualmente no es muy aprovechada. Al utilizarla

como materia prima en la producción de productos químicos, como la sílice, que son adsorbentes naturales y puede ser usados para la adsorción de colorantes.

En el ámbito profesional, este estudio puede servir como base para futuras investigaciones a nivel nacional sobre la revalorización de subproductos agrícolas, enfocándose en métodos que sean amigables con el medio ambiente y que ofrezcan soluciones efectivas a la contaminación por colorantes.

El ODS 12 (2023) establece la justificación de esta práctica en la posibilidad de recuperar de manera sostenible subproductos de interés como la paja y la cáscara, tanto en su vertido como en su quema para su eliminación, prácticas que son muy contaminantes. Implementar tecnologías limpias y que se relacionen con la economía circular en la recuperación de residuos es la línea de trabajo a seguir en la conversión de residuos, en recursos de valor, como biogás o productos químicos como la sílice; disminuyendo el impacto ambiental para la agricultura y un uso eficiente de los recursos naturales, la única forma para llegar a un adecuado desarrollo sostenible en la agricultura.

Por lo tanto, la pregunta principal de investigación es ¿cómo se puede revalorizar los residuos de postcosecha del cultivo de arroz como adsorbentes eficientes para la remoción de colorantes en el agua y que impactos tiene en términos técnicos, económicos y ambientales?

## **Objetivo general**

Evaluar la eficiencia en la obtención de productos de mayor valor añadido a partir de residuos de la siembra de arroz y su aplicación en la adsorción de colorantes.

## **Objetivos específicos**

- Obtener sílice a partir de la cascarilla de arroz implementando una técnica mecanoquímica.

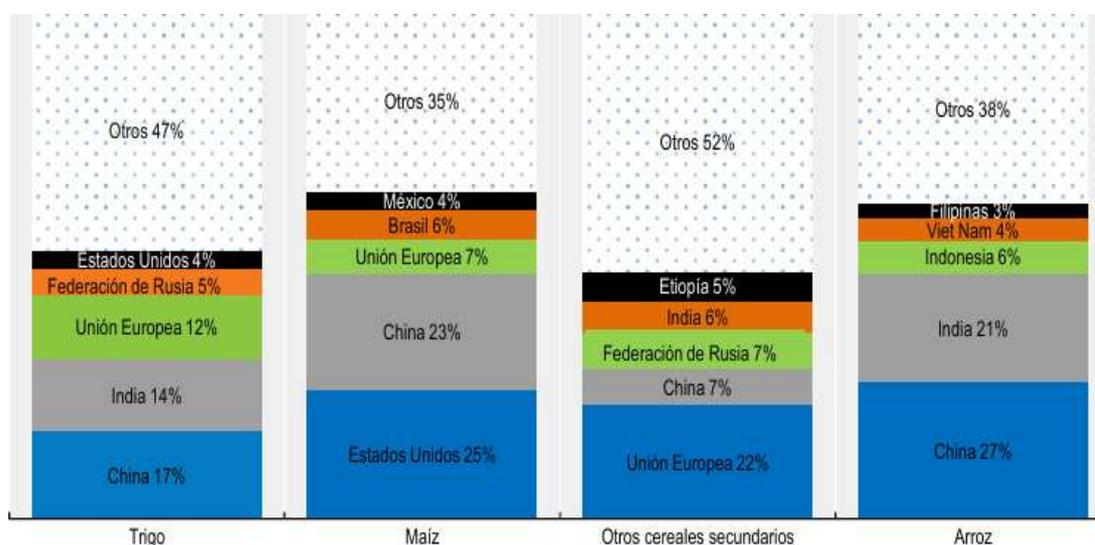
- Evaluar la capacidad de adsorción en diferentes concentraciones de sílice y de colorante.
- Determinar la concentración óptima de sílice como adsorbente y su impacto ambiental de su implementación.

## CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

### Bases teóricas

#### *El arroz como uno de los principales alimentos consumidos en el mundo.*

La demanda mundial de los cereales representa un 48% - 65% en el mundo siendo estos como el trigo, Maíz, Arroz y otros cereales secundarios, se indica que para el 2030 existirá un aumento de 2.7 a 3 millones de toneladas donde se obtendrá un crecimiento de 146 millones de toneladas solo para el consumo (OECD/FAO, 2021).



**Figura.1** Demanda mundial de cereales para el 2030 (OECD/FAO, 2021).

El arroz es uno de los alimentos más significativos del mundo, con una representación del 21% de las calorías consumidas a nivel mundial y siendo fundamental para la seguridad alimentaria de más de la mitad de la población mundial, La producción global del arroz alcanzó los 505 millones de toneladas en 2022, con Asia generando el 90.6% del total, seguida de América con un 5.2%, lo que hace que estas dos regiones sean esenciales en la seguridad alimentaria mundial, se espera que la demanda mundial de arroz continúe creciendo, especialmente en África debido al aumento poblacional (Mohidem et al., 2022).

### ***Generación de residuos en la producción arrocerá***

El arroz es la tercera fuente de alimentos en el mundo, la producción de arroz conlleva la generación de diferentes tipos de desechos durante el proceso de cultivo, las etapas de mayor generación de desechos corresponden a la siembra, cosecha y postcosecha. A nivel mundial, el 20% aproximadamente de la producción se considera como desecho y esta asciende a 2.170.000 toneladas, superando los 9 millones de kilogramos (Génesis Alejandra Zambrano Zambrano et al., 2021).

El principal impacto ambiental de los desechos radica en su descomposición en el campo. Estos desechos, al oxidarse, pueden producir CO<sub>2</sub> por cada g de materia seca quemada. Existe una alta correlación entre la quema de estos desechos y la quema de rastrojos de arroz en los campos, lo que causa contaminación en el aire y del suelo. Los desechos agroindustriales son la cascarilla, arroz partido, arroz quebrado, barbecho del arroz, residuos del proceso de molienda y otros. Estos pueden ser utilizados en diferentes procesos y constituirse en fuentes para la generación de energía industrial (Hector Rubén Robles Jimarez, 2023). Otra utilización de los desechos industriales es su reincorporación al campo, cumpliendo una función agronómica de materia orgánica muerta en campos sembrados; dañan la automaticidad de los ecosistemas naturales cercanos a las áreas arroceras.

### ***Problemática del manejo de residuos Agrícolas***

La gestión inadecuada de los residuos sólidos del ámbito agrario es un problema que persiste en el tiempo, donde la generación de residuos sólidos agrícolas ha crecido de forma exponencial en los últimos años, de hecho, se estima que está por encima con un aumento del 7,5 % al año que tiene como origen el desconocimiento de las prácticas de manejo correctas. La inadecuada gestión de esta tipología de residuos, con un pronunciado vertido o quema al aire libre, ha dado lugar a uno de los principales problemas ambientales que afecta a la sociedad actual. Ello ha conllevado la generación de un conjunto muy amplio de impactos negativos en el

medio ambiente (contaminación), incluyendo el aire, el suelo, el agua, así como la emisión de gases y partículas contaminantes (Oluseun Adejumo & Adebukola Adebisi, 2021).

### ***Efectos Ambientales de la quema de paja y cascarilla***

Las prácticas de la quema de paja y cáscara de arroz producen de forma directa significativos impactos ambientales, con efectos en la calidad del suelo y el aire. En la combustión, se liberan una serie de contaminantes atmosféricos nocivos, tales como partículas y compuestos orgánicos volátiles (COV), que no sólo desmejoran la calidad del aire, sino que también pueden generar problemas respiratorios y otras enfermedades expertas en la salud de las poblaciones circunvecinas. Así mismo, la quema de paja de arroz es la responsable de emitir grandes cantidades de gases de efecto invernadero (GEI) como el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y el metano (CH<sub>4</sub>), aumentando los efectos o problemas del cambio climático (Rathour et al., 2023).

Mohammadi Galangash et al. (2022) indica que una de las consecuencias más importantes de la quema de cáscara de arroz y de paja es la degradación del suelo. Si bien la combustión puede permitir cierto retorno de nutrientes al suelo de forma temporal (nitrógeno y potasio), también se asocia con la pérdida de materia orgánica necesaria y de microorganismos del suelo. Dichos cambios conllevan una disminución duradera de la fertilidad del suelo. Las altas temperaturas que intervienen en la quema reducen la humedad del suelo y las poblaciones microbianas, que son importantes para mantener la estructura del suelo y el ciclo de nutrientes. De manera gradual, la práctica de quema puede conducir a un suelo más compacto y menos fértil, lo que influye en la producción de cultivos.

### ***Propiedades físico – química de la paja y cascarilla del arroz***

Las propiedades físico - química de la cascarilla de arroz son fundamentales para determinar sus aplicaciones y conocer si afectan a los diversos procesos industriales y medioambientales. La cascarilla de arroz está constituida esencialmente por sílice (alrededor del

20%). Además, su estructura es porosa, característica que le confiere una baja densidad a granel, y que resulta útil para su aplicación dentro del ámbito de los materiales de construcción u otros materiales avanzados. El contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina que presentan tanto la cascarilla como la paja de arroz y que abarca en torno al 80% de su composición, resulta determinante para la estabilidad y para su uso en productos de bioingeniería (Peng et al., 2024).

Estructuralmente, la paja de arroz puede considerarse como un tipo de biomasa lignocelulósica, dado que su contenido en estos polímeros da lugar a una determinada proporción de cada uno de ellos; en este caso, el contenido de celulosa de la paja de arroz es de aproximadamente 38% de celulosa, 25% de hemicelulosa y 12% de lignina, lo que hace que sea adecuada para distintas aplicaciones en la industria de los bioproductos (Van Hung et al., 2020). Esta composición, finalmente, hace que sea una opción interesante para su valorización a través de la producción de materiales compuestos y otros productos derivados, ya que su composición química va a ser variable dependiendo de la planta, las condiciones de crecimiento y el tipo de tejido vegetal, entre otros, y que técnicamente hace que sus aplicaciones industriales puedan ser diferentes.

### ***Revalorización de Residuos del cultivo de arroz como estrategia sostenible***

La revalorización de los residuos que se origina por el uso de arroz como alimento, particularmente la cáscara o paja de arroz, se configura como una prometedora estrategia de sostenibilidad que puede contribuir a la reducción de residuos y al ahorro de recursos. La cáscara de arroz, que es un material rico en sílice, puede ser convertida en productos de valor añadido tales como la sílice, que se aplica en materiales compuestos, como adsorbentes para el tratamiento de aguas o como gestor de desechos industriales. Existen investigaciones donde se demuestran el uso de materiales reciclando de la cáscara de arroz en aplicaciones ambientales reduce la contaminación por metales pesados, por lo que permite soluciones ecológicas y sostenibles (Sanoja-López et al., 2023).

Por otro lado, la paja de arroz no sólo puede ser convertida en biogás o bioetanol, sino que también puede adecuarse al modelo de economía circular mediante la cual se recubriría residuos en los recursos en forma de energía. Recientemente se han llevado a cabo investigaciones como la de Luo et al. (2024) donde se usan métodos de pretratamiento, como, por ejemplo, por la digestión anaeróbica, cuyo resultado sería que la paja de arroz produjera, en cantidad suficiente metano, contribuyendo así a la producción de energía renovable. El uso integrado de los sistemas de bioenergía dada la relación que mantienen esos sistemas entre las fuentes de energía biosostenibles aportaría un eventual camino para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero que producen las fuentes tradicionales de energía.

### ***Uso de los residuos del arroz para la producción de biogás***

La utilización de residuos de arroz, en particular la paja de arroz, para su aprovechamiento en la producción de biogás ha cobrado un auge singular dado sus características para la producción de energía renovable. La digestión anaeróbica de la paja de arroz es indudablemente uno de los métodos más empleados para la producción de biogás, sobre todo en la digestión con otros tipos de residuos sólidos orgánicos como los restos de cocina o el estiércol animal. Los resultados muestran que la digestión con otros residuos puede incrementar sustancialmente el rendimiento del biogás. De hecho, la mezcla de paja de arroz con estiércol de cerdo y los restos de cocina producen 674,4 L de biogás por kg de sólidos volátiles (SV), un incremento del 71,67% comparativamente con la paja de arroz (Ye et al., 2013).

Nuevas mejoras en la obtención de biogás a partir de la paja de arroz fueron obtenidas mediante métodos de reducción de tamaño y pretratamiento. En digestores termofílicos, la reducción de la paja de arroz a tamaños de partículas de 0,088 a 0,4 mm maximizada con suplementos de micronutrientes mejoró la producción de metano en hasta un 46%. También se analizaron tratamientos químicos (especialmente el uso de soluciones ácidas o alcalinas) que aseguran la descomposición de la lignina, la cual usualmente es la causante de la disminución

de la biodegradabilidad de la paja de arroz, lo que incrementa los rendimientos metánicos (Ngan et al., 2020).

### ***Reutilización de los desechos del cultivo de arroz como materiales de construcción***

La reutilización de la ceniza de cáscara de arroz (RHA) en la construcción ha despertado el interés de los investigadores y los profesionales de la construcción debido a sus beneficios ambientales y a sus propiedades estructurales cuáles son y por qué son relevantes; de hecho, estos trabajos han mostrado que la adición de RHA en el hormigón puede mejorar la sostenibilidad al reducir el uso de cemento Portland, parte relevante de las emisiones de CO<sub>2</sub>. El RHA ha sido ideado para ser usado como sustituto, en ciertas aplicaciones, de hasta el 20% del cemento por peso, lo que disminuye las emisiones de CO<sub>2</sub> en aproximadamente 0,83 kg de CO<sub>2</sub> por cada kg de cemento sustituido. Esto no solo ayuda a reducir el impacto ambiental, sino que también contribuye a la durabilidad y resistencia de los materiales de construcción, como los ladrillos geopolímeros, más ecológicos que los ladrillos de arcilla tradicionales (Nagaraju & Bahrami, 2024).

Investigaciones como las de Marín-Calvo et al. (2023) indican que la cáscara de arroz consigue, a partir de un material emergente e innovador, una barrera térmica eficiente y sostenible. La investigación realizada en torno a sus propiedades térmicas ha permitido constatar que sumar fibras de cáscara de arroz en los paneles de yeso que hacen de aislamiento térmico o que se emplean para conseguir la impermeabilidad de las paredes, puede disminuir la conductividad térmica y/o mejorar el rendimiento del aislamiento, lo que convierte a la cáscara de arroz en un elemento de gran potencial a la hora de construcción.

### ***Abonos agrícolas creados con biomasa de arroz***

El uso de la biomasa de cáscara de arroz en la elaboración de fertilizantes agrícolas ha demostrado tener un potencial muy importante para mejorar el rendimiento de los cultivos y la

salud del suelo. Las investigaciones apuntan a que el biocarbón, sujeto a una serie de tratamientos en las cáscaras de arroz, aplicado al suelo, mejora la estructura del suelo, favorece la retención de nutrientes e incrementa la actividad microbiana. Esto es muy beneficioso para optimizar el rendimiento de los cultivos, pero también para evitar la pérdida de nutrientes por lixiviación. Por ejemplo, cuando el biocarbón se combina con *Bacillus pumilus*, una bacteria promotora del crecimiento en plantas, el resultado es un aumento del crecimiento de las raíces, así como de la adsorción de nutrientes, lo que se traduce en un incremento de la producción en el cultivo de arroz. La estructura porosa del biocarbón ayuda en la retención de nutrientes, pero también favorece la actividad microbiana, lo cual promete ser una herramienta que facilite prácticas agrícolas sostenibles (Win et al., 2019).

Por otra parte, biocarbón de cáscara de arroz en adición a otras enmiendas como la cal y fertilizantes de fósforo pueden ser muy efectivos en suelos ácidos. De hecho, Mosharraf et al. (2022) ha mostrado que el biocarbón aumenta la biodisponibilidad de nutrientes y disminuye elementos tóxicos, como pueden ser el Al o el Fe en el suelo. En ensayos de campo establecidos en maíz, la adición de biocarbón de cáscara de arroz y la disminución de los niveles de P y de cal han llevado a unos incrementos drásticos en el crecimiento de las plantas o de sus niveles de adsorción de nutrientes, con incrementos en el rendimiento del 62,38% con respecto a las condiciones de control. Por lo tanto, el biocarbón de cáscara de arroz como uno de los mecanismos de las estrategias de gestión integrada de nutrientes, tiene un gran potencial para incrementar la productividad del cultivo y disminuir el uso de fertilizantes químicos.

### ***Estructura y Propiedades de la sílice extraída de la cascarilla de arroz***

La sílice que se obtiene de la cascarilla de arroz es un material de interés por su satisfactorio contenido amorfo y su alta pureza, características que se consiguen con ciertos métodos de procesado, como la calcinación y el proceso sol-gel. La cascarilla de arroz tiene un

contenido de sílice de entre el 15% y el 17%, lo que permite considerarla como una materia prima viable para obtener este material (Chandrasekhar et al., 2003). En el procesado, se obtiene sílice amorfa con propiedades especiales como un alto área superficial y una estructura porosa, que la hacen adecuada para aplicaciones industriales como adsorbentes o fillers.

La fácil disposición amorfa de la sílice proveniente de la cascarilla de arroz obedece a unas condiciones particulares de calcinación, que eliminan impurezas, pero evitando que cristalice el material. A su vez, la sílice amorfa es interesante para ciertas aplicaciones, de forma que la superficie porosa favorece enormemente la capacidad de la sílice para adsorber. Por otro lado, investigaciones como la de Yuan et al. (2024) demuestran que el tamaño de las partículas de sílice obtenidas puede oscilar entre los 10 y los 20 nanómetros, en función del método empleado, en este caso el secado por congelación, que favorece el obtener nanopartículas homogéneas.

### ***Uso de la sílice en la adsorción de contaminantes***

La sílice utilizada en la adsorción de contaminantes ha probado ser una técnica eficaz para el tratamiento de aguas residuales, así como eliminar metales pesados y compuestos orgánicos. También, la sílice puede adsorber contaminantes de manera eficaz, es lo que se ha podido detectar en las investigaciones recientes como las de (Sanna Angotzi et al., 2021) que transforma la sílice en aerogeles de sílice modificados ya que tienen una gran capacidad de adsorción de metales pesados y dióxido de carbono. La capacidad de adsorción también está relacionada con la estructura porosa del material, lo que le permite atrapar una mayor cantidad de contaminantes en su superficie.

Uno de los aspectos más atractivos de la sílice en la adsorción es su capacidad para ser regenerada y reusada en el ciclo de adsorción-desorción, contribuyendo a la sostenibilidad para el medio ambiente. Esto, como ya se ha dicho, no sólo reduce los costes de explotación, sino que también reduce el impacto medioambiental. Los estudios indican que los aerogeles de sílice,

por ejemplo, pueden ser utilizados en reactores fluidizados, para la captura de contaminantes de forma eficiente, incluso en concentraciones mínimas (Akhter et al., 2022). Esto abre un amplio rango de aplicaciones futuras en el tratamiento de aguas y del control de la contaminación industrial.

### ***Extracción de Sílice mediante Pirolisis***

La acumulación de sílice en la cascarilla de arroz mediante pirólisis es un método eficaz que hace uso del alto contenido de sílice de la cascarilla de arroz, que es aproximadamente del 20%. El tratamiento consiste en calentar la biomasa a temperaturas entre 500 y 700 °C (Guo et al., 2021). El tratamiento previo mediante ácidos como el HCl sirve para eliminar impurezas tales como los óxidos metálicos y mejorar la pureza del producto de sílice obtenido. Se han encontrado muestras de sílice pura a más del 99% si se llevan a temperaturas mayores de los 600 °C. El tratamiento no solo permite la formación de sílice amorfa muy pura, sino que también genera bioaceites y gas de síntesis como subproductos, lo que permite la valorización multiuso del material de desecho (Bakar et al., 2016).

### ***Extracción de Sílice mediante Combustión Controlada***

La obtención de sílice mediante la combustión controlada, en especial de residuos agropecuarios como es la cáscara de arroz (HR), es un proceso que ha sido objeto de un gran número de trabajos de investigación debido al abundante contenido en sílice que poseen. Hay un método muy interesante para obtener sílice que consiste en la combustión controlada de la cáscara de arroz a temperaturas controladas (600 °C - 700 °C). Este proceso puede llegar a dar lugar a sílice con purezas de hasta un 99,7%, pero este resultado se alcanzará solamente si se realizan los tratamientos previos y posteriores necesarios para obtener sílice de elevada pureza. El principal obstáculo para solventar es el mantener una combustión controlada, ya que la obtención de impurezas es habitual cuando el proceso de combustión no es controlado (Beidaghy Dizaji et al., 2019).

### ***Extracción de Sílice mediante un Tratamiento Ácido***

La extracción de sílice a partir de la cascarilla de arroz aportando un tratamiento ácido es un proceso químico eficiente que trata de eliminar las impurezas metálicas y orgánicas del residuo agrícola mencionado. En un estudio que se detalla como cierto, usando ácido clorhídrico al 1M y un tiempo de tratamiento de 60 minutos se puede obtener una pureza de la sílice del 83.98%, eliminado potasio y otras impurezas que tienden a concentrarse en la superficie de la cascarilla de arroz. Este tratamiento es importante en la obtención de sílice pura, por lo que constituye un proceso de importancia para la industria avanzada (Zarib et al., 2019).

### ***Extracción de Sílice mediante Mecanoquímica***

La obtención de sílice por mecanoquímica ha cobrado importancia por su eficacia y menor impacto medioambiental. Este procedimiento utiliza molinos de alta energía, a diferencia de los métodos convencionales que exigen altas temperaturas o incluyendo reactivos agresivos, con el fin de activar mecánicamente los enlaces en los minerales ricos en sílice con el objetivo de la extracción de sílice de estos. El procedimiento mecanoquímico a cenizas volantes con cloruro de sodio seguido de lixiviación ácida permitió recuperar aproximadamente un 90 % de sílice en condiciones controladas, lo que podría establecer su potencial como una opción más sostenible en comparación con otros métodos tradicionales que necesitan más energía e implican la obtención de subproductos tóxicos (L. Wang et al., 2024).

En otro enfoque, el uso de molinos de bolas con lixiviación alcalina ha sido una combinación exitosa en el desarrollo de la utilización de sílice a partir de residuos agroindustriales como es el caso de la cáscara de arroz. En este caso, el tratamiento continuo mediante molienda y lixiviación al 1M de NaOH permitió obtener rendimientos de sílice del 89% y una caracterización de muy buena calidad según las normativas de pruebas que se llevaron a cabo (ICP-OES y difracción de rayos X) (Park et al., 2021). Este es un buen ejemplo de que la mecanoquímica

forma parte de un método más tradicional para llevar a cabo sílice. En este caso, se demuestran mejoras significativas en la eficiencia y la sostenibilidad en la obtención de sílice.

### ***Problemática de la contaminación de masas de agua por vertidos de colorantes***

La contaminación de masas de agua debido a la descarga de colorantes, en particular vertidos por la industria textil, es un problema ambiental significativo dado el carácter tóxico de los efluentes. Los colorantes utilizados, como los reactivos y azoderivados, contienen con frecuencia metales pesados y compuestos orgánicos difíciles de degradar de forma natural. Estos agentes reducen gravemente la calidad del agua al descomponer drásticamente los niveles de oxígeno disuelto debido a la estequiometría para el metabolismo aeróbico de la materia orgánica, lo que causa una asfixia de los organismos acuáticos (Lin et al., 2023). Asimismo, al conferir un color negro intenso al agua, se bloquea la iluminación solar para los procesos fotosintéticos en las plantas acuáticas, lo que altera el equilibrio ecológico del sistema.

Otro aspecto fundamental es la presencia de sólidos disueltos y metales pesados como el cromo y el cadmio, que son no solo mortales para la fauna acuática, sino también una seria amenaza a la salud del ser humano por la contaminación de las fuentes de agua potables, ya que su ingestión puede provocar elevados problemas de salud (enfermedades renales y hepáticas). El mal tratamiento de estos efluentes favorece que estos contaminantes pervivan en el medio natural, lo que hace que la biodiversidad y la cadena trófica empiecen a verse afectadas (Sudarshan et al., 2023).

A pesar de la posibilidad de aplicar algunos tratamientos como la adsorption; coagulación y membranas, la mayoría de estos vertidos han mantenido altos niveles de colorantes, demanda química de oxígeno (DQO) y otras sustancias contaminantes. El grado de eficacia de estas técnicas varía notablemente como consecuencia las características del agua, lo cual hace mantener el problema en un gran número de industrias (Yaseen & Scholz, 2019). Además, la complejidad de estas soluciones y lo elevado de su coste dificultan la generalización; lo cual

significa la necesidad de encontrar métodos de fabricación de tratamientos más eficientes y baratos para paliar los colores.

### ***Efectos causados por los vertidos de colorantes en la vida acuática***

Las descargas de colorantes industriales ocasionan diversos efectos adversos en la vida acuática como consecuencia de la toxicidad de los compuestos presentes en los vertidos. Los colorantes industriales disminuyen la penetración de la luz en los cuerpos de agua, lo que afecta la fotosíntesis de los organismos acuáticos, especialmente las algas, lo que provoca una reducción de la producción de oxígeno, hipoxia que alteran los ciclos biológicos y la supervivencia de las especies en la cadena trófica. La acumulación de los colorantes industriales en los sedimentos puede inducir efectos de toxicidad a largo plazo en los peces y otros organismos acuáticos expuestos a compuestos carcinógenos o mutagénicos (Maqbool et al., 2020).

Investigaciones como las de Pranay Dutta et al. (2022) muestra que los colorantes también presentan efectos negativos en algunos microorganismos acuáticos esenciales para la biodegradación de materia orgánica en los ecosistemas de tipo acuático. Estos compuestos tóxicos provocan alteraciones en la estructura y en la función de las comunidades microbianas, lo que a su vez puede propiciar la acumulación de las sustancias de tipo orgánico y afectar la calidad del agua. Otros colorantes, como los de tipo azo, son más difíciles de biodegradar, lo que conlleva que su persistencia sea más prolongada y que aumenten sus probabilidades de bioacumulación en la fauna de ambiente acuático.

### ***Adsorción de colorantes como solución de bajo costo***

La retención de colorantes a partir de adsorbentes de bajo coste ha demostrado ser una solución eficaz y económica para eliminar este contaminante en cuerpos de agua. La invitación para utilizar materiales como cáscaras de frutas, bagazo de caña y otros restos de la agricultura para la eliminación de colorantes orgánicos como el azul de metileno y de colorantes sintéticos puede dar muy buenos resultados debido a la gran superficie específica y propiedades químicas

que muestran estos materiales, capaces de captar las moléculas de los colorantes a partir de procesos de adsorción física y química (McKay et al., 1999).

Un estudio reciente ha manifestado la eficacia de la cáscara de naranja como un bioadsorbente de bajo coste en la eliminación de colorantes de las soluciones acuosas. Con el presente estudio, la cáscara de naranja activada resultó eficiente en la adsorción de metales pesados y colorantes, habiéndose registrado hasta un 90% de eliminación (İşlek Coşkun & Ün, 2024). Este tipo de soluciones no solamente se puede considerar económicamente viable, sino que también fomenta la reutilización de residuos agrícolas, de forma que se ayuda a la sostenibilidad y la disminución de la contaminación.

Los residuos derivados de cáscara de arroz resultan ser una solución efectiva y de precio accesible para la descontaminación de aguas. El carbón activado obtenido a partir de residuos de cáscara de arroz es un material de alta capacidad de adsorción, especialmente para colorantes azo como el negro directo y el azul de metileno. Esto es debido a que este material dispone de una alta superficie específica y presenta también grupos funcionales que los hacen interactuar con las moléculas de los colorantes, lo que favorece su eliminación, incluso en bajas concentraciones (Arivumani V. et al., 2024). Por otra parte, la cáscara de arroz resulta una materia prima abundante y económica, lo cual la hace un material muy interesante para la descontaminación de aguas en el marco de los procesos sostenibles ambientalmente.

## **Estado del Arte**

Investigaciones, como la de Xiong et al. (2020), demuestran que la sílice extraída mediante pirólisis tiene un rendimiento de adsorción de azul de metileno del 85% en tan solo 2 minutos. Al activarse con Fe, su capacidad de adsorción aumenta a un 98,8% en 90 minutos, debido a una mayor dispersión de las moléculas, lo que optimiza la adsorción. Sin embargo, el principal inconveniente de este método es la lixiviación de hierro, que alcanza un 0,46% cada 10 a 20 minutos.

Además, otros autores, como Villota-Enríquez & Rodríguez-Páez (2023), emplearon métodos alternativos, como la combustión controlada, variando las temperaturas y las concentraciones del agente digestor para extraer sílice y usarla en la adsorción de azul de metileno. Los resultados mostraron que la biomasa sometida únicamente a tratamiento térmico produce sílice con una capacidad de adsorción del 30%. En cambio, al aplicar temperaturas elevadas entre 450 y 550 °C y una solución de HCl con una concentración de 3 N, la capacidad de adsorción aumenta significativamente a un 50%. Finalmente, la sílice extraída a 650 °C y con HCl a 3 N alcanzó una capacidad de adsorción del 70%.

Se anticipa que mediante un método mecanoquímico, combinado con la aplicación de temperaturas de 550 °C y soluciones de HCl a 3 N, se logre extraer sílice con altos porcentajes de porosidad. Esta porosidad elevada favorecería una mayor superficie activa, facilitando una mejor adherencia y retención de azul de metileno en los sitios de adsorción. Además, este enfoque podría optimizar la eficiencia del proceso al mejorar tanto la capacidad de adsorción como la estabilidad del material en aplicaciones a largo plazo, lo que lo hace prometedor para su uso en procesos de purificación o descontaminación.

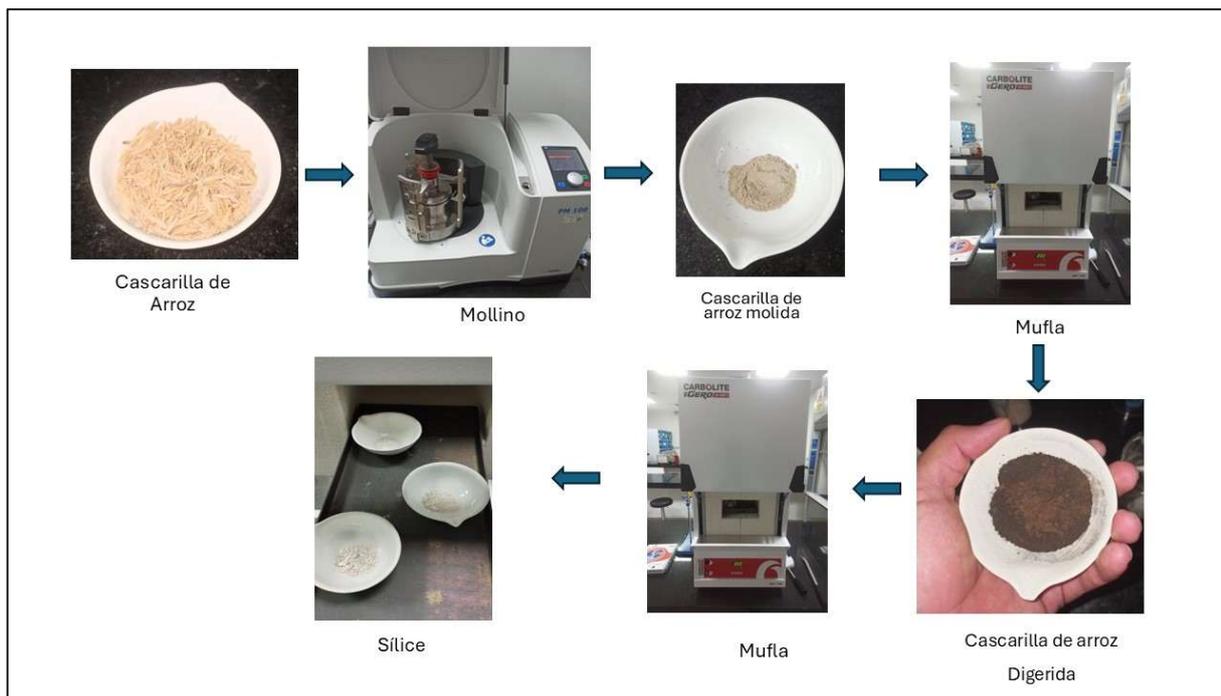
## **CAPÍTULO 3: MARCO METODOLÓGICO**

### **Introducción a la metodología utilizada**

Este estudio se enmarca en una investigación experimental debido a la necesidad de realizar pruebas y ensayos con los residuos obtenidos del cultivo de arroz como la cascarilla y la paja de arroz, para evaluar su capacidad como adsorbente de colorantes. Además, este trabajo tiene un alcance exploratorio, ya que se indaga en la capacidad de materiales no convencionales (biomasa agrícola) para ser revalorizados.

### **Materiales y métodos del objetivo específico 1**

Para la extracción de sílice, se empleó el método patentado de Luque et al. (2018), que ha mostrado como resultado una sílice de alta pureza. El proceso comenzó con la molienda de cascarilla de arroz, utilizando un molino planetario de bolas modelo PM 100. En la bandeja del equipo se colocaron 18 bolas con un diámetro de 15 mm, junto con 10 g de cascarilla de arroz. El molino se configuró a 500 revoluciones por minuto (rpm) durante 15 minutos, sin intervalos, obteniéndose partículas finas. Posteriormente, el material se tamizó con un tamiz de 90  $\mu\text{m}$  para asegurar la homogeneidad de las partículas. El diagrama del proceso puede observarse en la figura 2.



**Figura. 2** Diagrama de la elaboración de la sílice a partir de la cascarilla de arroz (elaboración propia).

Después de la molienda, se introdujeron 2 g de cascarilla de arroz molida en las cápsulas de la mufla, donde se añadieron 25 ml de ácido clorhídrico (HCl) a una concentración de 0.3 M, diluido en 1000 ml de agua desionizada. Este ácido actúa como digestor, eliminando el material orgánico y dejando solo el material inorgánico. La mufla se configuró a 200°C durante 2 horas. Posteriormente, la solución se transfirió a un vaso de precipitación y se secó en la estufa a 100°C durante 24 horas, eliminando la humedad residual. El material seco fue colocado nuevamente en la mufla a 550°C durante 4 horas, obteniéndose finalmente una sílice de alta pureza.

### **Materiales y métodos del objetivo específico 2**

Para evaluar la capacidad de adsorción en diferentes concentraciones de sílice y de colorante se realizó los siguientes pasos:

### **1. Tamizado de la sílice**

Inicialmente, la sílice fue sometida a un proceso de tamizado utilizando un tamiz con una abertura de 90  $\mu\text{m}$ . Este paso permitió obtener partículas finas y uniformes de sílice, asegurando la consistencia del material utilizado en los experimentos posteriores.

### **2. Preparación de la solución de azul de metileno**

Se preparó una solución madre de azul de metileno con una concentración de 1000 ppm (partes por millón). Esta solución fue utilizada como base para la preparación de las diferentes concentraciones necesarias para el experimento.

### **3. Pesaje de la sílice**

En una balanza analítica, se pesaron cuatro diferentes cantidades de sílice para su posterior uso en la mezcla con las soluciones de azul de metileno. Este paso fue fundamental para garantizar la exactitud en las concentraciones finales de las soluciones experimentales.

### **4. Preparación de las soluciones de azul de metileno**

Se prepararon cuatro soluciones de azul de metileno con concentraciones de 25 ppm, 50 ppm, 75 ppm y 100 ppm a partir de la solución madre de 1000 ppm, utilizando la fórmula de dilución:

$$C_1 V_1 = C_2 V_2$$

Donde:

- $C_1$  es la concentración deseada (25 ppm, 50 ppm, 75 ppm, 100 ppm)
- $V_1$  es el volumen deseado (175 ml)
- $C_2$  es la concentración de la solución madre (1000 ppm)

- $V_2$  es el volumen a utilizar de la solución madre

Las soluciones fueron preparadas de la siguiente manera:

- Para la solución de 25 ppm: se mezclaron 4.375 ml de la solución madre de azul de metileno (1000 ppm) con 170.625 ml de agua destilada.
- Para la solución de 50 ppm: se utilizaron 8.75 ml de la solución madre de azul de metileno y 166.25 ml de agua destilada.
- Para la solución de 75 ppm: se mezclaron 13.125 ml de la solución madre con 161.875 ml de agua destilada.
- Para la solución de 100 ppm: se utilizaron 17.5 ml de la solución madre y 157.5 ml de agua destilada.

## 5. Extracción de volúmenes de las soluciones preparadas

Posteriormente, se extrajeron 25 ml de cada una de las soluciones preparadas (25 ppm, 50 ppm, 75 ppm y 100 ppm) para su uso en los experimentos de adsorción.

## 6. Mezcla de las concentraciones de sílice y soluciones de azul de metileno.

En este paso, se colocaron cuatro concentraciones de sílice (0.05 g, 0.10 g, 0.15 g, y 0.20 g) en vasos de precipitados que contenían 25 ml de la solución de azul de metileno de 25 ppm replicándose el mismo procedimiento para 50 ppm, 75 ppm, 100ppm. Cada mezcla fue agitada en un agitador magnético con calentamiento a una velocidad de 400 rpm durante 2 horas. Este proceso permitió asegurar una adecuada dispersión y contacto entre la sílice y el azul de metileno para promover el fenómeno de adsorción.

## 7. Centrifugación de las soluciones

Después de la agitación, las mezclas fueron transferidas a tubos de ensayo con tapa rosca. Los tubos fueron centrifugados durante 10 minutos, lo que permitió la separación de las fases y el asentamiento de las partículas de sílice en el fondo del tubo. Este paso es crucial para obtener una solución clarificada, que posteriormente puede ser utilizada para análisis adicionales de adsorción.

Este protocolo permite realizar un análisis detallado de la capacidad de adsorción de diferentes concentraciones de sílice utilizando azul de metileno como modelo de adsorbato, siguiendo un enfoque riguroso para asegurar la precisión experimental.

### **Materiales y métodos del objetivo específico 3**

Para determinar la concentración óptima de sílice como adsorbente se realizó el siguiente procedimiento:

Se analizaron todas las muestras utilizando un cromatógrafo, en el cual se realizó una curva de calibración para medir la concentración de azul de metileno. Posteriormente, se extrajo sílice de todas las muestras correspondientes a las concentraciones de 25 ppm, 50 ppm, 75 ppm y 100 ppm. Este material extraído fue sometido a un análisis de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), que permitirá determinar la composición del material tras haber sido sometido a un proceso de adsorción. Este enfoque metodológico es fundamental para entender las interacciones entre el azul de metileno y el adsorbente, así como para evaluar la eficacia del proceso de adsorción.

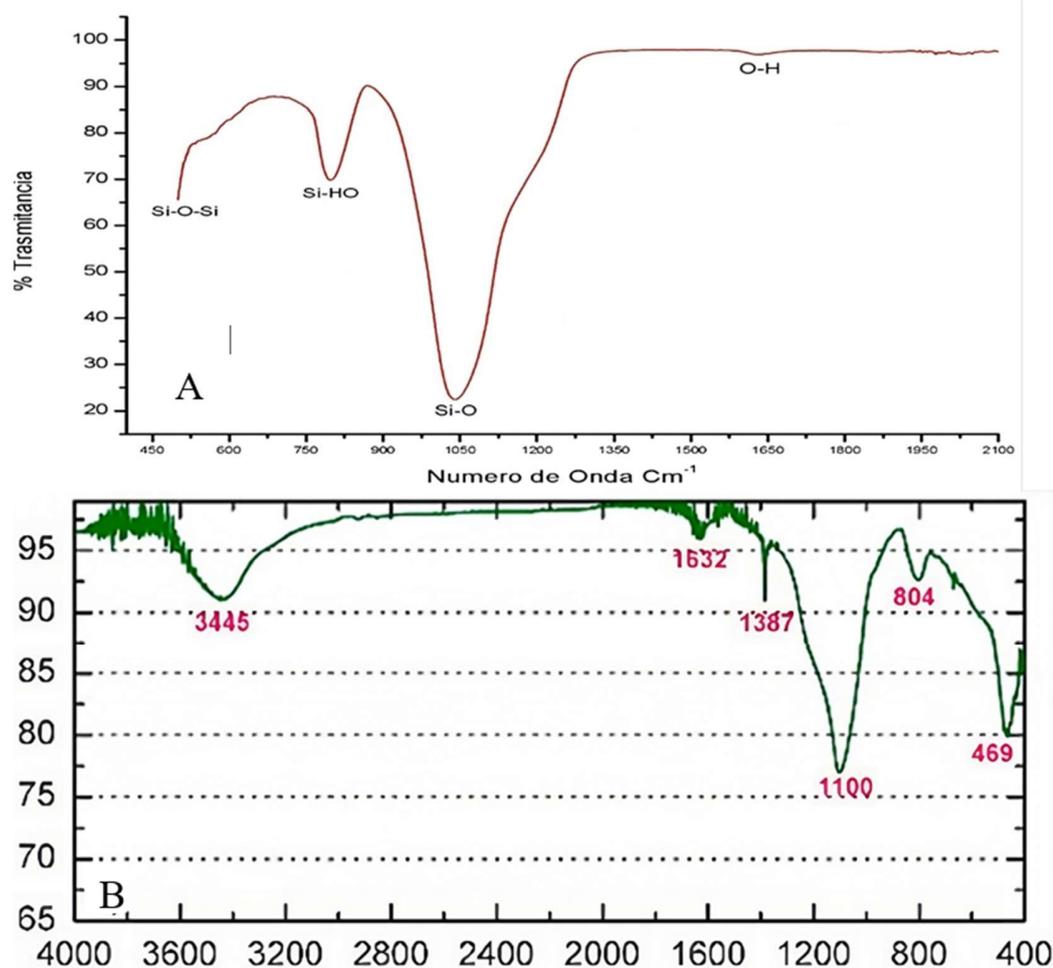
## **CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **Introducción a los resultados**

La valorización del residuo agrícola derivado de la siembra de arroz (cáscara y paja), ha mostrado ser una estrategia prometedora para la adsorción de colorantes en aguas residuales. Una serie de experimentos recientes han puesto de manifiesto que dichos residuos, mediante una serie de tratamientos puede actuar como un bioadsorbente con capacidad para remoción del colorante sintético presente en aguas residuales o desechos de industrias textiles. A continuación, se muestran los resultados de dicho contenido del residuo y su efectividad bajo distintas condiciones experimentales.

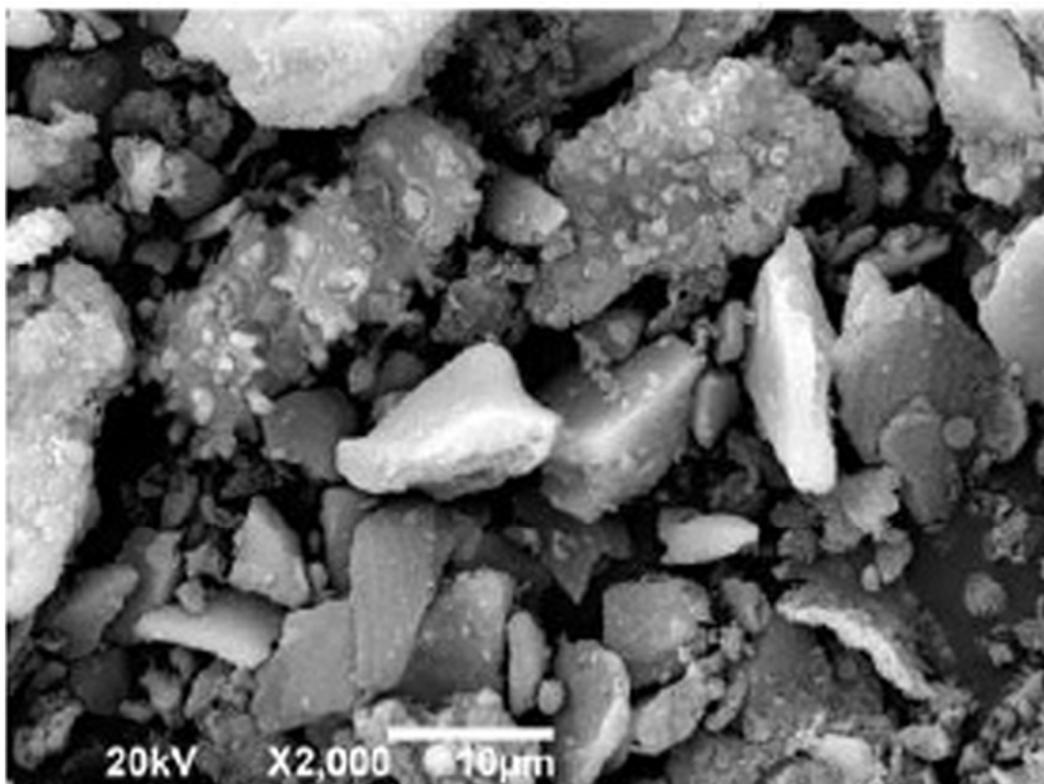
### **Resultados del objetivo específico 1**

La sílice obtenida se caracterizó mediante espectroscopia FTIR, y el análisis en la Fig. 2 mostró una serie de picos en distintos números de onda, asociados a los enlaces Si-O-Si, Si-O y Si-OH. La presencia de estos grupos funcionales resulta fundamental debido a su capacidad para adsorber moléculas, especialmente colorantes y contaminantes orgánicos. La formación de estos enlaces favorece la interacción entre la superficie de la sílice y los contaminantes en disolución, incrementando así su capacidad de remediación ambiental. La correcta identificación de estos picos confirma que el material obtenido posee una estructura adecuada para su empleo en procesos de purificación y tratamiento de aguas residuales.



**Figura.3** (A) Espectro FTIR de la sílice obtenida de la cascarilla de arroz después de ser sometida por un proceso químico (elaboración propia), (B) sílice obtenida por (Villota-Enríquez & Rodríguez-Páez, 2023).

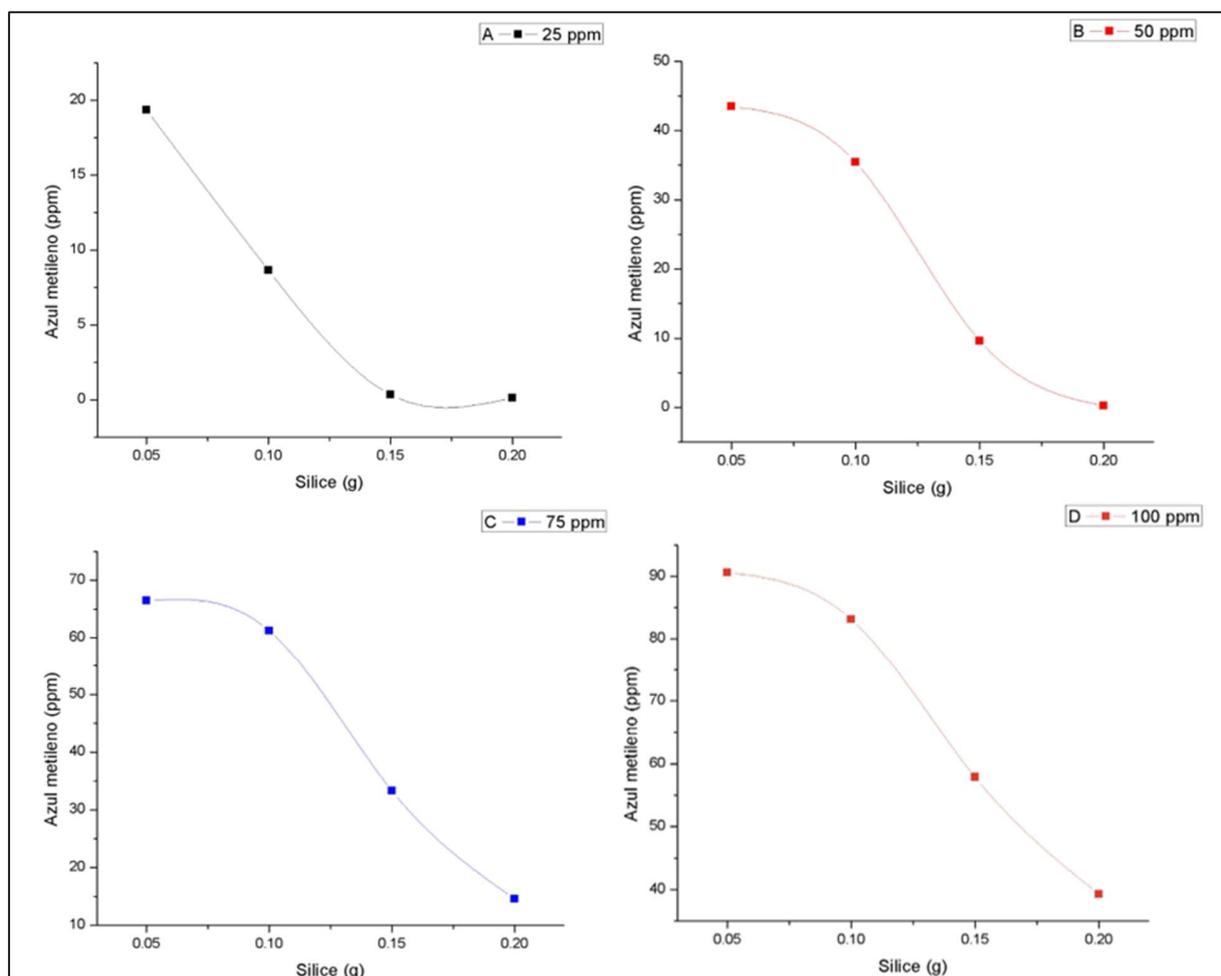
Los resultados como los de la Fig. 3 realizados por Villota-Enríquez & Rodríguez-Páez (2023) exhiben, con la ayuda de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), una estructura porosa con partículas submicrométricas en la sílice, y en su análisis FTIR se pudieron identificar enlaces característicos como Si-O-Si y Si-OH. Dado que dichas conclusiones son coincidentes con los picos del FTIR de la sílice obtenida en este estudio, es posible inferir que el material sintetizado en este trabajo pudiera compartir características funcionales similares.



**Figura.4** Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) de la sílice obtenida de la cascarilla de arroz (Villota-Enríquez & Rodríguez-Páez, 2023).

## Resultados del objetivo específico 2

Los resultados de las pruebas revelan una reducción significativa en las concentraciones de azul de metileno, como se ilustra en la figura 5. Los datos de adsorción de estas muestras correspondientes a distintas concentraciones iniciales: (A) 25 ppm, (B) 50 ppm, (C) 75 ppm y (D) 100 ppm. En cada caso, se observa que el material adsorbente logra disminuir eficazmente la concentración del contaminante, demostrando su eficiencia y potencial para el tratamiento de aguas contaminadas.



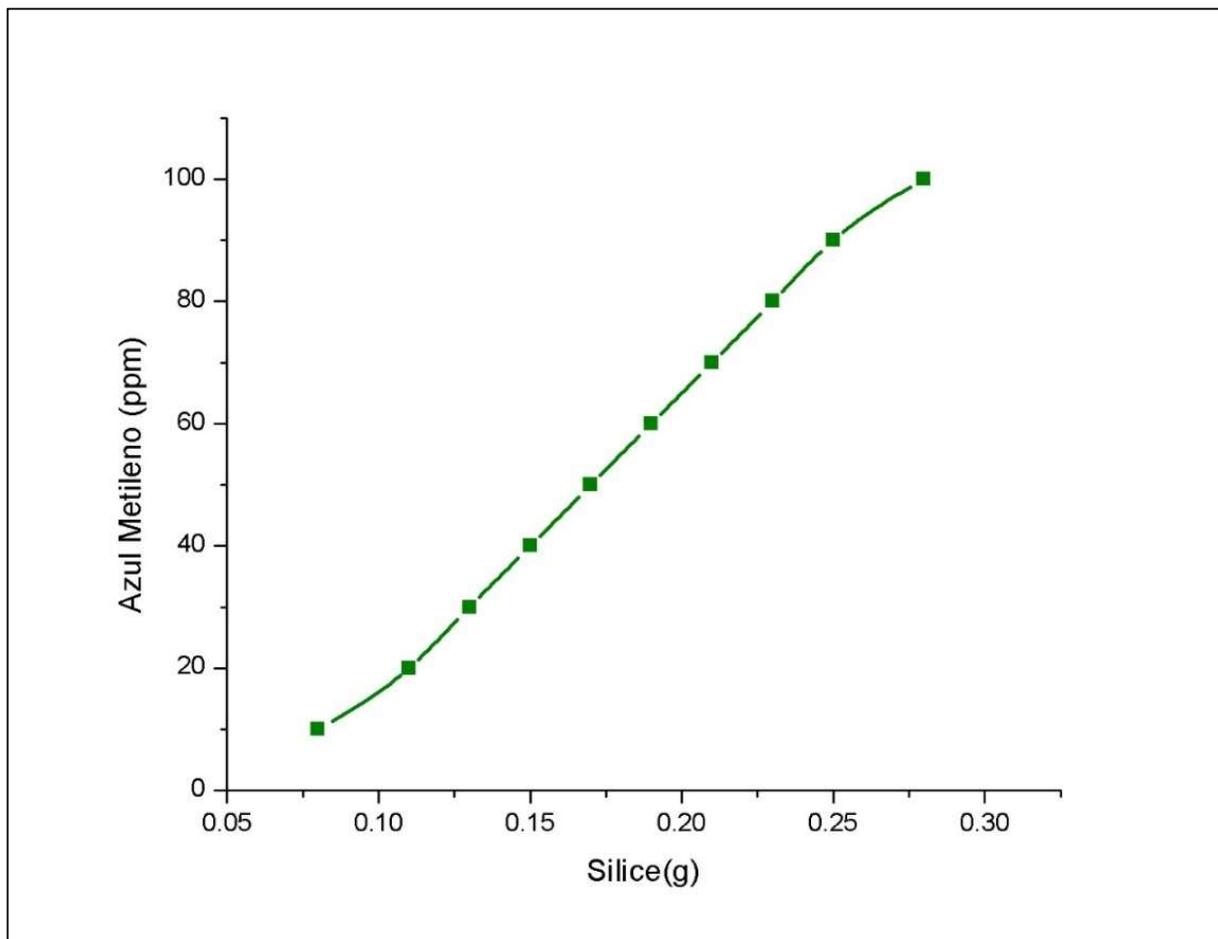
**Figura.5** Reducción de la concentración de azul de metileno utilizando diferentes concentraciones de sílice (elaboración propia).

El comportamiento observado destaca que, a medida que se incrementa la cantidad de sílice, la concentración del contaminante disminuye de forma consistente. Esto evidencia la capacidad de la sílice para actuar como un material adsorbente eficiente, aunque con variaciones en la magnitud de la reducción según la concentración inicial.

A una concentración inicial de 25 ppm, la disminución es constante y destacada, alcanzando un valor final de 0.12 ppm. En el caso de 50 ppm, se registra una reducción significativa que lleva la concentración a 0.22 ppm. Por otro lado, en concentraciones más elevadas de 75 y 100 ppm, las reducciones alcanzan valores de 14.75 y 39.27 ppm, respectivamente. Estos resultados indican que la eficacia de la sílice como material adsorbente es más pronunciada en soluciones menos concentradas, posiblemente debido a limitaciones en su capacidad de adsorción a concentraciones iniciales más altas. Esto refuerza la viabilidad de la sílice como un adsorbente eficiente, especialmente en aplicaciones orientadas al tratamiento de soluciones con bajas concentraciones de contaminantes.

### **Resultados del objetivo específico 3**

La dosis óptima de sílice se determina en función de la concentración inicial de azul de metileno presente en el área afectada, como se muestra en la figura 6. En esta figura, se pueden observar distintas cantidades de sílice recomendadas para cada concentración inicial del contaminante, de manera que se obtienen resultados más efectivos en la remoción de azul de metileno. Estas dosis han sido ajustadas cuidadosamente para evitar efectos adversos en el medio donde se realiza el tratamiento, minimizando el riesgo de contaminación por un uso excesivo de sílice. Este enfoque asegura que el uso de sílice sea tanto eficaz como seguro, optimizando el proceso de descontaminación sin comprometer la salud del ecosistema.



**Figura.6** Dosificación óptima de sílice según la concentración de azul metileno (elaboración propia).

## Discusión

La presente investigación evidencia que la sílice extraída de la cascarilla de arroz presenta un rendimiento notable en la adsorción de colorantes. Con 0.05 g del material se logró reducir el 6.52% del colorante, mientras que 0.2 g alcanzaron una adsorción del 60.43%. Al comparar estos resultados con los obtenidos por Singh & Yadav (2024), quienes evaluaron métodos alternativos para la adsorción de colorantes utilizando semillas de *Trigonella foenum-graecum* (F) y *Linum usitatissimum* (L). Tras procesos de limpieza, maceración y secado, se obtuvieron resultados prometedores. Con 0.1 g de semillas de F se adsorbió hasta el 13.98% del colorante, mientras

que 0.2 g lograron una adsorción del 22.63%. Por otro lado, 0.1 g de semillas molidas de L redujeron el 15.71%, y 0.2 g alcanzaron el 28.88%. La combinación de ambas semillas (F+L) en proporción 2:2 mostró un efecto sinérgico, logrando con 0.1 g una adsorción del 22.71% y con 0.2 g hasta el 41.44%. Esta comparativa muestra la eficiencia y potencial del material.

Otras indagaciones como las de Ren et al. (2024) han demostrado la eficacia del musgo *Sphagnum* en la adsorción de colorantes como el azul de metileno, tras someterlo a tratamientos con ácidos para modificar su textura y aumentar su porosidad. Estos cambios facilitan la retención del colorante por unidad de masa. Sin embargo, este método requiere mayores cantidades del material para tratar altas concentraciones de contaminante, en comparación con la sílice. Además, la producción de grandes volúmenes de musgo modificado implica un uso significativo de ácidos como el sulfúrico donde se usa 60 mL a 14,4 mol/L y el nítrico en el que se usa 120 mL a 18,4 mol/L, lo que puede generar un impacto ambiental negativo debido a la generación de residuos químicos durante el proceso.

## **CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES**

La presente investigación ha destacado el potencial de la cascarilla de arroz como recurso valioso en la adsorción de colorantes presentes en aguas residuales, especialmente en la industria textil. Este estudio no solo contribuye a la reducción de residuos agrícolas mediante la valorización de subproductos, sino que también introduce una alternativa sostenible y económica para el tratamiento de aguas contaminadas.

Los resultados obtenidos subrayan que la sílice extraída de la cascarilla de arroz, debido a su estructura porosa y funcionalidad, tiene una notable capacidad para adsorber contaminantes, lo cual presenta implicaciones significativas. Este avance podría facilitar la implementación de tecnologías de tratamiento de agua de bajo costo y fomentar una gestión más sostenible de los residuos en la producción agrícola. Además, el enfoque de aprovechamiento de la biomasa respalda objetivos globales de sostenibilidad, como la economía circular y la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero.

Para potenciar el impacto de esta investigación, futuros estudios podrían enfocarse en la optimización de los métodos de extracción de sílice y la mejora de sus propiedades adsorbentes, así como en la evaluación de su efectividad en distintos tipos de contaminantes. También sería beneficioso explorar el escalamiento del proceso y su viabilidad económica en escenarios industriales, garantizando un uso eficiente de recursos y fortaleciendo la integración de soluciones ecológicas en la gestión de residuos agrícolas.

## BIBLIOGRAFÍA

- Akhter, F., Rao, A. A., Abbasi, M. N., Wahocho, S. A., Mallah, M. A., Anees-ur-Rehman, H., & Chandio, Z. A. (2022). A Comprehensive Review of Synthesis, Applications and Future Prospects for Silica Nanoparticles (SNPs). *Silicon*, *14*(14), 8295–8310.  
<https://doi.org/10.1007/s12633-021-01611-5>
- Arivumani V., Singh V., Geetha C., & Senthilkumar C. (2024). Activated rice husk biochar for azo dye removal: batch adsorption, kinetics and thermodynamic studies. *Global NEST Journal*, *26*(2), 1–14. <https://doi.org/10.30955/gnj.005498>
- Bakar, R. A., Yahya, R., & Gan, S. N. (2016). Production of High Purity Amorphous Silica from Rice Husk. *Procedia Chemistry*, *19*, 189–195. <https://doi.org/10.1016/j.proche.2016.03.092>
- Beidaghy Dizaji, H., Zeng, T., Hartmann, I., Enke, D., Schliermann, T., Lenz, V., & Bidabadi, M. (2019). Generation of High Quality Biogenic Silica by Combustion of Rice Husk and Rice Straw Combined with Pre- and Post-Treatment Strategies—A Review. *Applied Sciences*, *9*(6), 1083. <https://doi.org/10.3390/app9061083>
- Chandrasekhar, S., Satyanarayana, K. G., Pramada, P. N., Raghavan, P., & Gupta, T. N. (2003). Review Processing, properties and applications of reactive silica from rice husk—an overview. *Journal of Materials Science*, *38*(15), 3159–3168.  
<https://doi.org/10.1023/A:1025157114800>
- Chen, R., Congress, S. S. C., Cai, G., Duan, W., & Liu, S. (2021). Sustainable utilization of biomass waste-rice husk ash as a new solidified material of soil in geotechnical engineering: A review. *Construction and Building Materials*, *292*, 123219.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123219>
- Dutta, A., Patra, A., Hazra, K. K., Nath, C. P., Kumar, N., & Rakshit, A. (2022). A state of the art review in crop residue burning in India: Previous knowledge, present circumstances and

future strategies. *Environmental Challenges*, 8, 100581.

<https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100581>

Fernandes, I. J., Moraes, C. A. M., Egea, J. R. J., & Sousa, V. C. (2024). Production and characterization of silica materials from rice husk ash by different combustion processes.

*Powder Technology*, 436, 119473. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.119473>

Génesis Alejandra Zambrano Zambrano, Valery Lilibeth García Macías, Carlos Alfredo Cedeño Palacios, & Ulbio Eduardo Alcívar Cedeño. (2021). *Aprovechamiento de la cascarilla de arroz (Oryza sativa) para la obtención de fibras de celulosa. Polo del Conocimiento*. 6(4).

<https://doi.org/10.23857/pc.v6i4.2572>

Ginting, E. M., Bukit, N., Motlan, M., & Sani, R. A. (2022). Data extraction of nano silica as a potential filler in nanocomposites from rice husk ash with ballmill and coprecipitation

methods. *Data in Brief*, 45, 108656. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.108656>

Guo, W., Li, G., Zheng, Y., & Li, K. (2021). Nano-silica extracted from rice husk and its application in acetic acid steam reforming. *RSC Advances*, 11(55), 34915–34922.

<https://doi.org/10.1039/D1RA05255A>

Gupte, A. P., Basaglia, M., Casella, S., & Favaro, L. (2022). Rice waste streams as a promising source of biofuels: feedstocks, biotechnologies and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167, 112673. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112673>

Hector Rubén Robles Jimarez. (2023). *Valorización de la paja del arroz: Nueva estrategia de remediación responsable de nitrato del ciclo integral del agua* [Universidad de Valencia ].

<https://roderic.uv.es/rest/api/core/bitstreams/9e300d24-9b6b-4fca-97f8-665a080ed8ee/content>

İşlek Coşkun, Y., & Ün, R. N. (2024). Sustainable remediation of nickel (II) in aqueous solutions using waste orange peel biomass as a bioadsorbent. *Chemical Papers*.

<https://doi.org/10.1007/s11696-024-03726-6>

- Lin, J., Ye, W., Xie, M., Seo, D. H., Luo, J., Wan, Y., & Van der Bruggen, B. (2023). Environmental impacts and remediation of dye-containing wastewater. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(11), 785–803. <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00489-8>
- Luo, W., Tian, H., Tan, W., & Tan, Q. (2024). Effect of hydrothermal-acid pretreatment on methane yield and microbial community in anaerobic digestion of rice straw. *Bioresource Technology*, 402, 130765. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.130765>
- Luque, R., De, S., Balu, A. M., Romero, A. A., & Franco, A. (2018). Integrated Mechanochemical/Microwave-Assisted Approach for the Synthesis of Biogenic Silica-Based Catalysts from Rice Husk Waste. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6(9), 11555–11562. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b01738>
- Maqbool, Z., Nadeem, H., Mahmood, F., Siddique, M. H., Shahzad, T., Azeem, F., Shahid, M., Muzammil, S., & Hussain, S. (2020). *Environmental Effects and Microbial Detoxification of Textile Dyes* (pp. 289–326). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-48985-4\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-030-48985-4_14)
- Marín-Calvo, N., González-Serrud, S., & James-Rivas, A. (2023). Thermal insulation material produced from recycled materials for building applications: cellulose and rice husk-based material. *Frontiers in Built Environment*, 9. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2023.1271317>
- McKay, G., Porter, J. F., & Prasad, G. R. (1999). The Removal of Dye Colours from Aqueous Solutions by Adsorption on Low-cost Materials. *Water, Air, and Soil Pollution*, 114(3/4), 423–438. <https://doi.org/10.1023/A:1005197308228>
- Mohammadi Galangash M<sup>1</sup>, Ghasemi Zolpirani R<sup>1</sup>, Askari Tappeh F<sup>2</sup>, & Forouhar Vajargah M<sup>3</sup>. (2022). *A Review on the Effects of Rice Straw Burning on the Rice Paddy Fields, Guilan Province Iran*. <https://austinpublishinggroup.com/environmental-sciences/fulltext/aes-v7-id1068.php>

- Mohidem, N. A., Hashim, N., Shamsudin, R., & Che Man, H. (2022). Rice for Food Security: Revisiting Its Production, Diversity, Rice Milling Process and Nutrient Content. *Agriculture*, 12(6), 741. <https://doi.org/10.3390/agriculture12060741>
- Morchid, A., El Alami, R., Raezah, A. A., & Sabbar, Y. (2024). Applications of internet of things (IoT) and sensors technology to increase food security and agricultural Sustainability: Benefits and challenges. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(3), 102509. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102509>
- Mosharrof, M., Uddin, Md. K., Mia, S., Sulaiman, M. F., Shamsuzzaman, S. M., & Haque, A. N. A. (2022). Influence of Rice Husk Biochar and Lime in Reducing Phosphorus Application Rate in Acid Soil: A Field Trial with Maize. *Sustainability*, 14(12), 7418. <https://doi.org/10.3390/su14127418>
- Nagaraju, T. V., & Bahrami, A. (2024). Sustainable Geopolymer Bricks Manufacturing Using Rice Husk Ash: An Alternative to Fired Clay Bricks. In *Sustainable Structures and Buildings* (pp. 65–75). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-46688-5\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-031-46688-5_5)
- Ngan, N. V. C., Chan, F. M. S., Nam, T. S., Van Thao, H., Maguyon-Detras, M. C., Hung, D. V., Cuong, D. M., & Van Hung, N. (2020). Anaerobic Digestion of Rice Straw for Biogas Production. In *Sustainable Rice Straw Management* (pp. 65–92). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-32373-8\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-32373-8_5)
- Nzereogu, P. U., Omah, A. D., Ezema, F. I., Iwuoha, E. I., & Nwanya, A. C. (2023). Silica extraction from rice husk: Comprehensive review and applications. *Hybrid Advances*, 4, 100111. <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2023.100111>
- ODS 12. (2023). *Objetivo 12: Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles*. <https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-Goals-Report->

2023\_Spanish.pdf?\_gl=1\*4kxdyg\*\_ga\*MTk0NDM0OTgwNy4xNzI2MTYzNzM0\*\_ga\_TK9B  
 QL5X7Z\*MTcyNzE5NjU1OC40LjAuMTcyNzE5NjU2My4wLjAuMA..

OECD/FAO. (2021). *OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2021-2030*.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1787/agr-data-en>

Oluseun Adejumo, I., & Adebukola Adebisi, O. (2021). Agricultural Solid Wastes: Causes, Effects, and Effective Management. In *Strategies of Sustainable Solid Waste Management*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.93601>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2024, March 8). *La oferta mundial de cereales en 2023/24 sigue siendo holgada; las perspectivas iniciales sobre la producción de trigo en 2024 son favorables*. Organización de Las Naciones Unidas Para La Alimentación y La Agricultura.

<https://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/es/>

Park, J. Y., Gu, Y. M., Park, S. Y., Hwang, E. T., Sang, B.-I., Chun, J., & Lee, J. H. (2021). Two-Stage Continuous Process for the Extraction of Silica from Rice Husk Using Attrition Ball Milling and Alkaline Leaching Methods. *Sustainability*, *13*(13), 7350.

<https://doi.org/10.3390/su13137350>

Peng, S.-L., Chen, Y.-L., & Dai, Y.-S. (2024). Composite Building Materials Prepared from Bioresources: Use of Rice Husk for Autoclaved Lightweight Concrete Production. *Journal of Composites Science*, *8*(9), 359. <https://doi.org/10.3390/jcs8090359>

Petrović, B., Bumbálek, R., Zoubek, T., Kuneš, R., Smutný, L., & Bartoš, P. (2024). Application of precision agriculture technologies in Central Europe-review. *Journal of Agriculture and Food Research*, *15*, 101048. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101048>

Pranay Dutta, Md. Razaya Rabbi, Mohammad Abu Sufian, & Shahnaz Mahjebin. (2022). *Effects of textile dyeing effluent on the environment and its treatment: A review*.

<https://doi.org/https://www.doi.org/10.30538/psrp-easl2022.0080>

- Rathour, R. K., Devi, M., Dahiya, P., Sharma, N., Kaushik, N., Kumari, D., Kumar, P., Baadhe, R. R., Walia, A., Bhatt, A. K., & Bhatia, R. K. (2023). Recent Trends, Opportunities and Challenges in Sustainable Management of Rice Straw Waste Biomass for Green Biorefinery. *Energies*, *16*(3), 1429. <https://doi.org/10.3390/en16031429>
- Ren, J., Zhang, S., Wang, Y., & Yang, H. (2024). Adsorption Properties and Mechanisms of Methylene Blue by Modified Sphagnum Moss Bio-Based Adsorbents. *Materials*, *17*(17), 4329. <https://doi.org/10.3390/ma17174329>
- Rendón-Castrillón, L., Ramírez-Carmona, M., Ocampo-López, C., González-López, F., Cuartas-Uribe, B., & Mendoza-Roca, J. A. (2024). Efficient bioremediation of indigo-dye contaminated textile wastewater using native microorganisms and combined bioaugmentation-biostimulation techniques. *Chemosphere*, *353*, 141538. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141538>
- Romero-Ocaña, I., Delgado, N. F., & Molina, S. I. (2022). Biomass waste from rice and wheat straw for developing composites by stereolithography additive manufacturing. *Industrial Crops and Products*, *189*, 115832. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2022.115832>
- Sanna Angotzi, M., Mameli, V., Cara, C., Borchert, K. B. L., Steinbach, C., Boldt, R., Schwarz, D., & Cannas, C. (2021). Meso- and macroporous silica-based arsenic adsorbents: effect of pore size, nature of the active phase, and silicon release. *Nanoscale Advances*, *3*(21), 6100–6113. <https://doi.org/10.1039/D1NA00487E>
- Sanoja-López, K. A., Loo-Molina, N. S., & Luque, R. (2023). Rice waste feedstocks: A review of alternatives for their conversion into high-value added products. *BioResources*, *19*(1). <https://doi.org/10.15376/biores.19.1.Sanoja-Lopez>
- Shen, Y., Zhao, P., & Shao, Q. (2014). Porous silica and carbon derived materials from rice husk pyrolysis char. *Microporous and Mesoporous Materials*, *188*, 46–76. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2014.01.005>

- Shi, X., Chang, J., Kim, M., Lee, M.-E., Shin, H.-Y., & Ok Han, S. (2024). Isopropanol production using engineered *Corynebacterium glutamicum* from waste rice straw biomass. *Bioresource Technology*, 396, 130416. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.130416>
- Singh, N., & Yadav, A. (2024). Sustainable adsorption of methylene blue (MB) dye using individual and combined ratios of *Trigonella foenum-graecum* (F) seed galactomannan and *Linum usitatissimum* (L) seed. *Water Practice & Technology*, 19(4), 1513–1541. <https://doi.org/10.2166/wpt.2024.059>
- Steven, S., Restiawaty, E., Pasyimi, P., & Bindar, Y. (2021). An appropriate acid leaching sequence in rice husk ash extraction to enhance the produced green silica quality for sustainable industrial silica gel purpose. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 122, 51–57. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2021.04.053>
- Sudarshan, S., Harikrishnan, S., RathiBhuvaneswari, G., Alamelu, V., Aanand, S., Rajasekar, A., & Govarthan, M. (2023). Impact of textile dyes on human health and bioremediation of textile industry effluent using microorganisms: current status and future prospects. *Journal of Applied Microbiology*, 134(2). <https://doi.org/10.1093/jambio/lxac064>
- Tan, B., Zeng, Y., Li, Y., Tan, X., Liu, C., Li, L., Zhuang, W., & Li, Z. (2023). Probing the effects of silicon amendment on combined stressors on rice: Lead pollution and blast fungus (*Magnaporthe oryzae*) infection. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 264, 115443. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115443>
- Tripathi, A. D., Mishra, R., Maurya, K. K., Singh, R. B., & Wilson, D. W. (2019). Estimates for World Population and Global Food Availability for Global Health. In *The Role of Functional Food Security in Global Health* (pp. 3–24). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813148-0.00001-3>
- Van Hung, N., Maguyon-Detras, M. C., Migo, M. V., Quilloy, R., Balingbing, C., Chivenge, P., & Gummert, M. (2020). Rice Straw Overview: Availability, Properties, and Management

- Practices. In *Sustainable Rice Straw Management* (pp. 1–13). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-32373-8\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-32373-8_1)
- Villota-Enrriquez, M. D., & Rodríguez-Páez, J. E. (2023a). Bio-silica production from rice husk for environmental remediation: Removal of methylene blue from aqueous solutions. *Materials Chemistry and Physics*, *301*, 127671. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.127671>
- Villota-Enrriquez, M. D., & Rodríguez-Páez, J. E. (2023b). Bio-silica production from rice husk for environmental remediation: Removal of methylene blue from aqueous solutions. *Materials Chemistry and Physics*, *301*, 127671. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.127671>
- Wang, L., Zhang, Z., Zhang, T.-A., Lv, G.-Z., Dou, Z.-H., & Zhang, X. (2024). *The Synergistic Extraction Kinetics of Aluminum and Silicon from High-Alumina Fly Ash by Carbochlorination* (pp. 153–164). [https://doi.org/10.1007/978-3-031-50244-6\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-031-50244-6_14)
- Wang, R., Li, D., Deng, F., Cao, Z., & Zheng, G. (2024). Production of artificial humic acid from rice straw for fertilizer production and soil improvement. *Science of The Total Environment*, *906*, 167548. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167548>
- Wang, Z., Li, B., Othman, A., & Zhang, Z. (2023). Endogenous alkali silica reaction evaluation of rice husk ash in mortar. *Journal of Building Engineering*, *75*, 106970. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106970>
- Win, K. T., Okazaki, K., Ookawa, T., Yokoyama, T., & Ohwaki, Y. (2019). Influence of rice-husk biochar and *Bacillus pumilus* strain TUAT-1 on yield, biomass production, and nutrient uptake in two forage rice genotypes. *PLOS ONE*, *14*(7), e0220236. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0220236>
- Xiong, J., Li, G., & Hu, C. (2020). Treatment of methylene blue by mesoporous Fe/SiO<sub>2</sub> prepared from rice husk pyrolytic residues. *Catalysis Today*, *355*, 529–538. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2019.06.059>

- Yadav, M., Dwibedi, V., Sharma, S., & George, N. (2022). Biogenic silica nanoparticles from agro-waste: Properties, mechanism of extraction and applications in environmental sustainability. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(6), 108550. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108550>
- Yaseen, D. A., & Scholz, M. (2019). Textile dye wastewater characteristics and constituents of synthetic effluents: a critical review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(2), 1193–1226. <https://doi.org/10.1007/s13762-018-2130-z>
- Ye, J., Li, D., Sun, Y., Wang, G., Yuan, Z., Zhen, F., & Wang, Y. (2013). Improved biogas production from rice straw by co-digestion with kitchen waste and pig manure. *Waste Management*, 33(12), 2653–2658. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.05.014>
- Yuan, S., Hou, Y., Liu, S., & Ma, Y. (2024). A Comparative Study on Rice Husk, as Agricultural Waste, in the Production of Silica Nanoparticles via Different Methods. *Materials*, 17(6), 1271. <https://doi.org/10.3390/ma17061271>
- Zarib, N. S. M., Abdullah\*, S. A., & Jamil, N. H. (2019). *Extraction Of Silica From Rice Husk Via Acid Leaching Treatment*. 175–183. <https://doi.org/10.15405/epsbs.2019.05.02.16>

## ANEXOS

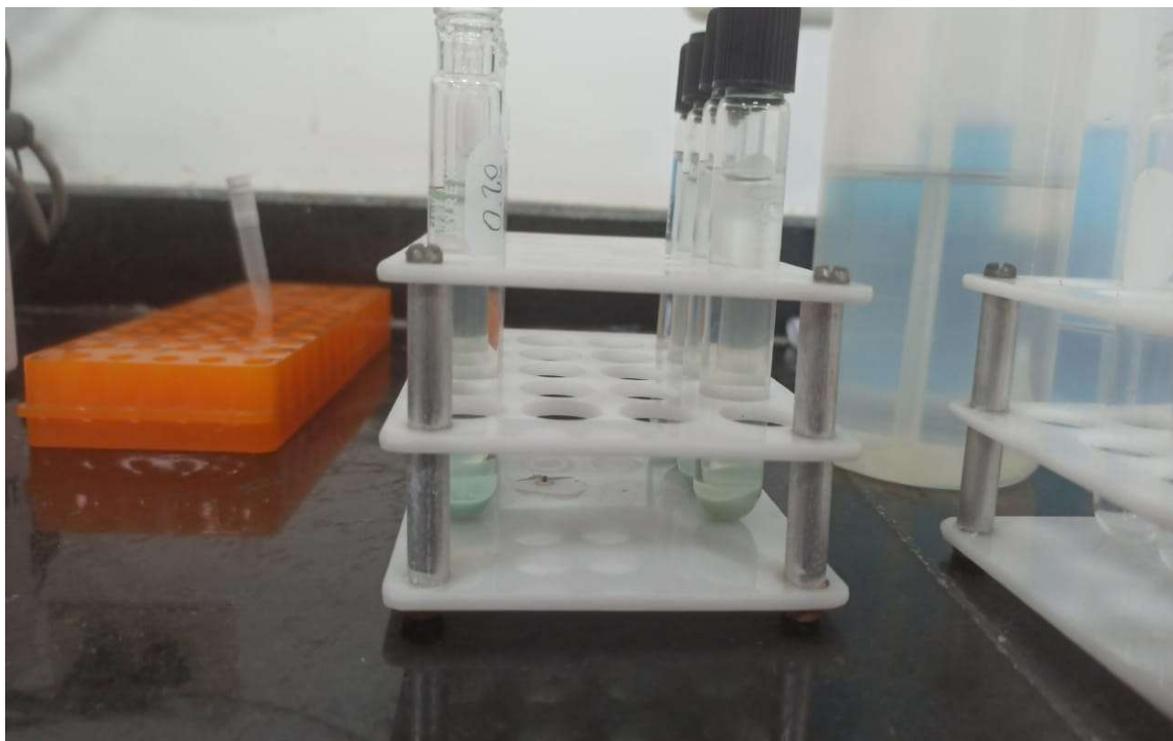
### Anexo A: Documentación gráfica



**Figura 7.** Muestras con distintas concentraciones de azul metileno para crear la curva de nivel en el cromatógrafo



**Figura 8.** Proceso de adsorción de azul metileno con distintas concentraciones de sílice.



**Figura 9.** Resultados de la adsorción de distintas concentraciones de azul metileno