



**UTMACH**

**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y DE LA SALUD**

**CARRERA DE INGENIERIA QUIMICA**

**RAQUIS DE BANANO OXIDADO CON TEMPO PARA LA  
RECUPERACIÓN DE ITRIO EN SOLUCIONES ACUOSAS.**

**PALADINES PINEDA ANTHONY MICHAEL  
INGENIERO QUIMICO**

**VALAREZO CHAVEZ SHAROL CAROLINA  
INGENIERA QUIMICA**

**MACHALA  
2023**



**UTMACH**

**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y DE LA SALUD**

**CARRERA DE INGENIERIA QUIMICA**

**RAQUIS DE BANANO OXIDADO CON TEMPO PARA LA  
RECUPERACIÓN DE ITRIO EN SOLUCIONES ACUOSAS.**

**PALADINES PINEDA ANTHONY MICHAEL  
INGENIERO QUIMICO**

**VALAREZO CHAVEZ SHAROL CAROLINA  
INGENIERA QUIMICA**

**MACHALA  
2023**



**UTMACH**

**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y DE LA SALUD**

**CARRERA DE INGENIERIA QUIMICA**

**TRABAJOS EXPERIMENTALES**

**RAQUIS DE BANANO OXIDADO CON TEMPO PARA LA  
RECUPERACIÓN DE ITRIO EN SOLUCIONES ACUOSAS.**

**PALADINES PINEDA ANTHONY MICHAEL  
INGENIERO QUIMICO**

**VALAREZO CHAVEZ SHAROL CAROLINA  
INGENIERA QUIMICA**

**CARCHI TANDAZO TANYA ALEXANDRA**

**MACHALA  
2023**

# RAQUIS DE BANANO OXIDADO CON TEMPO PARA LA RECUPERACIÓN DE ITRIO EN SOLUCIONES ACUOSAS

*por Sharol Carolina Valarezo Chavez*

---

**Fecha de entrega:** 14-mar-2024 08:30a.m. (UTC-0500)

**Identificador de la entrega:** 2320261790

**Nombre del archivo:** Valarezo\_Sharol.pdf (1.65M)

**Total de palabras:** 9094

**Total de caracteres:** 47438

# RAQUIS DE BANANO OXIDADO CON TEMPO PARA LA RECUPERACIÓN DE ITRIO EN SOLUCIONES ACUOSAS

## INFORME DE ORIGINALIDAD

9%

INDICE DE SIMILITUD

8%

FUENTES DE INTERNET

3%

PUBLICACIONES

3%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

1

[docslib.org](https://docslib.org)

Fuente de Internet

<1%

2

[repositorio.ucv.edu.pe](https://repositorio.ucv.edu.pe)

Fuente de Internet

<1%

3

[bibdigital.epn.edu.ec](https://bibdigital.epn.edu.ec)

Fuente de Internet

<1%

4

Submitted to Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco

Trabajo del estudiante

<1%

5

[www.idrc.ca](http://www.idrc.ca)

Fuente de Internet

<1%

6

Florencia Ruscasso, Brenda Bezus, Gabriela Garmendia, Silvana Vero, Gustavo Curutchet, Ivana Cavello, Sebastián Cavalitto.

"Debaryomyces hansenii F39A as biosorbent for textile dye removal", Revista Argentina de Microbiología, 2021

Publicación

<1%

7	<a href="#">qdoc.tips</a> Fuente de Internet	<1 %
8	Submitted to Universidad de Salamanca Trabajo del estudiante	<1 %
9	<a href="#">cybertesis.unmsm.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
10	<a href="#">docplayer.es</a> Fuente de Internet	<1 %
11	<a href="#">dspace.esPOCH.edu.ec</a> Fuente de Internet	<1 %
12	<a href="#">issuu.com</a> Fuente de Internet	<1 %
13	<a href="#">www.tandfonline.com</a> Fuente de Internet	<1 %
14	<a href="#">es.scribd.com</a> Fuente de Internet	<1 %
15	<a href="#">prezi.com</a> Fuente de Internet	<1 %
16	<a href="#">revistas.ug.edu.ec</a> Fuente de Internet	<1 %
17	Submitted to Universidad Jorge Tadeo Lozano Trabajo del estudiante	<1 %
18	Submitted to University of Sheffield Trabajo del estudiante	<1 %

19

[lermab.univ-lorraine.fr](http://lermab.univ-lorraine.fr)

Fuente de Internet

&lt;1 %

20

[ddd.uab.cat](http://ddd.uab.cat)

Fuente de Internet

&lt;1 %

21

[www.grafiati.com](http://www.grafiati.com)

Fuente de Internet

&lt;1 %

22

Submitted to Colegio Jorge Washington

Trabajo del estudiante

&lt;1 %

23

Submitted to Universidad Militar Nueva Granada

Trabajo del estudiante

&lt;1 %

24

[futur.upc.edu](http://futur.upc.edu)

Fuente de Internet

&lt;1 %

25

Gregorio Rius-Sorolla, Julien Maheut, Sofía Estelles-Miguel, José Pedro Garcia-Sabater. "Protocol: Systematic Literature Review on coordination mechanisms for the mathematical programming models in production planning with decentralized decision making", WPOM-Working Papers on Operations Management, 2017

Publicación

&lt;1 %

26

Submitted to The Hong Kong Polytechnic University

Trabajo del estudiante

&lt;1 %

27

Submitted to Universidad Cesar Vallejo

<1 %

28

Submitted to Universidad Nacional de  
Educacion Enrique Guzman y Valle

Trabajo del estudiante

<1 %

29

[repositorio.utmachala.edu.ec](http://repositorio.utmachala.edu.ec)

Fuente de Internet

<1 %

30

[ri.ues.edu.sv](http://ri.ues.edu.sv)

Fuente de Internet

<1 %

31

Submitted to uady

Trabajo del estudiante

<1 %

32

[www.convert-me.com](http://www.convert-me.com)

Fuente de Internet

<1 %

33

Morgana Suszek Gonçalves, João Paulo  
Bettin, Luiz Carlos Santos da Silva Junior, Silvio  
Cesar Sampaio et al. "ADEQUAÇÃO DOS  
MODELOS DE LANGMUIR E FREUNDLICH NA  
ADSORÇÃO DE COBRE EM SOLO ARGILOSO  
DO SUL DO BRASIL", HOLOS, 2013

Publicación

<1 %

34

[atlas-network.com](http://atlas-network.com)

Fuente de Internet

<1 %

35

[documentop.com](http://documentop.com)

Fuente de Internet

<1 %

36

[en.calameo.com](http://en.calameo.com)

Fuente de Internet

<1 %

37

[es.weforum.org](http://es.weforum.org)

Fuente de Internet

<1 %

38

[www.bdigital.unal.edu.co](http://www.bdigital.unal.edu.co)

Fuente de Internet

<1 %

39

Submitted to Consorcio CIXUG

Trabajo del estudiante

<1 %

40

Submitted to Universidad Católica de Santa  
María

Trabajo del estudiante

<1 %

41

[cabierta.uchile.cl](http://cabierta.uchile.cl)

Fuente de Internet

<1 %

42

[dspace.utb.edu.ec](http://dspace.utb.edu.ec)

Fuente de Internet

<1 %

43

[eprints.ucm.es](http://eprints.ucm.es)

Fuente de Internet

<1 %

44

[koreascience.or.kr](http://koreascience.or.kr)

Fuente de Internet

<1 %

45

[www.alunaranjo.com](http://www.alunaranjo.com)

Fuente de Internet

<1 %

46

[www.escuelacolombia.org.co](http://www.escuelacolombia.org.co)

Fuente de Internet

<1 %

47

[www.researchgate.net](http://www.researchgate.net)

Fuente de Internet

<1 %

48

[1library.co](http://1library.co)

Fuente de Internet

<1 %

49

AG González, JM Santana-Casiano, M González-Dávila, N Pérez. "Effect of organic exudates of *Phaeodactylum tricornutum* on the Fe(II) oxidation rate constant", *Ciencias Marinas*, 2011

Publicación

<1 %

50

[de.slideshare.net](http://de.slideshare.net)

Fuente de Internet

<1 %

51

[dokumen.site](http://dokumen.site)

Fuente de Internet

<1 %

52

[dspace.ups.edu.ec](http://dspace.ups.edu.ec)

Fuente de Internet

<1 %

53

[hdl.handle.net](http://hdl.handle.net)

Fuente de Internet

<1 %

54

[iris.uniroma1.it](http://iris.uniroma1.it)

Fuente de Internet

<1 %

55

[patents.google.com](http://patents.google.com)

Fuente de Internet

<1 %

56

[public.wmo.int](http://public.wmo.int)

Fuente de Internet

<1 %

[repository.uamerica.edu.co](http://repository.uamerica.edu.co)

57	Fuente de Internet	<1 %
58	tr-ex.me Fuente de Internet	<1 %
59	www.coursehero.com Fuente de Internet	<1 %
60	www.monografias.com Fuente de Internet	<1 %
61	www.oceanblogs.org Fuente de Internet	<1 %
62	www.proz.com Fuente de Internet	<1 %
63	www.ulcera.com.mx Fuente de Internet	<1 %
64	zagan.unizar.es Fuente de Internet	<1 %

Excluir citas

Apagado

Excluir coincidencias

Apagado

Excluir bibliografía

Apagado

## CLÁUSULA DE CESIÓN DE DERECHO DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL

Los que suscriben, PALADINES PINEDA ANTHONY MICHAEL y VALAREZO CHAVEZ SHAROL CAROLINA, en calidad de autores del siguiente trabajo escrito titulado RAQUIS DE BANANO OXIDADO CON TEMPO PARA LA RECUPERACIÓN DE ITRIO EN SOLUCIONES ACUOSAS., otorgan a la Universidad Técnica de Machala, de forma gratuita y no exclusiva, los derechos de reproducción, distribución y comunicación pública de la obra, que constituye un trabajo de autoría propia, sobre la cual tienen potestad para otorgar los derechos contenidos en esta licencia.

Los autores declaran que el contenido que se publicará es de carácter académico y se enmarca en las disposiciones definidas por la Universidad Técnica de Machala.

Se autoriza a transformar la obra, únicamente cuando sea necesario, y a realizar las adaptaciones pertinentes para permitir su preservación, distribución y publicación en el Repositorio Digital Institucional de la Universidad Técnica de Machala.

Los autores como garantes de la autoría de la obra y en relación a la misma, declaran que la universidad se encuentra libre de todo tipo de responsabilidad sobre el contenido de la obra y que asumen la responsabilidad frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros de manera exclusiva.

Aceptando esta licencia, se cede a la Universidad Técnica de Machala el derecho exclusivo de archivar, reproducir, convertir, comunicar y/o distribuir la obra mundialmente en formato electrónico y digital a través de su Repositorio Digital Institucional, siempre y cuando no se lo haga para obtener beneficio económico.



PALADINES PINEDA ANTHONY MICHAEL

0706443611



VALAREZO CHAVEZ SHAROL CAROLINA

0706288784

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo de titulación con profunda gratitud y cariño a mis padres Manuel Paladines y Carmita Pineda, cuyo apoyo económico y moral fueron pilares fundamentales en este proceso. A mi amigo Christian Balcázar, por su invaluable asistencia en la experimentación. A mis compañeros y docentes, cuya generosidad intelectual y dedicación de tiempo fueron de inestimable ayuda. A todos aquellos que de una u otra forma han contribuido a este logro, mi más sincero agradecimiento. Sin su apoyo, este trabajo no habría sido posible.

***Anthony Michael Paladines Pineda***

A mis queridos padres, fuente inagotable de amor y sabiduría, dedico cada logro que este camino me ha permitido alcanzar. Por ser el escalón principal de mi carrera, por enseñarme que los sueños se persiguen con el corazón y se alcanzan con perseverancia.

A mi hermana Betsi, mi amiga y confidente de toda la vida, quien ha sido mi sombra y mi luz, mi rival ocasional pero mi aliada perpetua en cada etapa de este viaje.

A mi novio Ection F, mi apoyo inquebrantable en tiempos difíciles y mi mayor fanático en cada victoria. Gracias por caminar a mi lado en esta travesía hacia la realización de mis sueños, por ser mi roca en los momentos difíciles y por compartir las alegrías de cada logro alcanzado.

A mis tíos Bolívar, Betty y a mi hermosa abuela Corina, que, desde siempre, han sido mis guías, y en muchas ocasiones, la voz de la razón que me ha guiado a través de la maraña de la vida y que han celebrado mis triunfos como si fueran suyos.

Sin sus consejos sabios y sin su amor incondicional, no sería la persona que hoy soy. Los amo con todo mi corazón y celebro no solo mi éxito, sino también la fortuna de tenerlos en mi vida.

***Sharol Carolina Valarezo Chávez***

## **AGRADECIMIENTO**

Primeramente, elevamos nuestras gracias a Dios por su guía y bendiciones constantes, permitiéndonos enfrentar cada desafío con fe y perseverancia.

A nuestros padres, pilares de amor y sacrificio, gracias por su apoyo incondicional, por creer en nosotros incluso cuando el camino parecía incierto. Su ejemplo de tenacidad y amor inquebrantable ha sido nuestra mayor motivación.

A nuestra tutora la Ing. Tanya Carchi, cuya sabiduría, paciencia y dedicación han sido cruciales en cada etapa de este proceso. Gracias por compartir su conocimiento, por desafiarnos a pensar críticamente y por prepararnos para enfrentar el futuro con confianza.

A la Universidad Técnica de Machala, por ser un espacio de crecimiento, innovación y desarrollo, más que un lugar de estudio; ha sido nuestro segundo hogar, donde hemos forjado amistades duraderas y adquirido lecciones valiosas para la vida.

Al Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), localizado en Quevedo, provincia de los Ríos, por habernos abierto sus puertas y poner a disposición sus equipos para realizar los análisis experimentales necesarios para nuestra investigación.

Este logro es el resultado de un esfuerzo conjunto, y estamos eternamente agradecidos con todos aquellos que han sido parte de nuestro viaje. Gracias por creer en nosotros, por su tiempo, paciencia y por brindarnos la oportunidad de alcanzar nuestras metas.

Con profundo respeto y llenos de gratitud

***Michael Paladines y Sharol Valarezo***

## RESUMEN

El itrio ( $Y^{+3}$ ) es uno de los elementos de las tierras raras (REE) reconocido por su aspecto plateado, brillante y propiedades como su ligereza, ductilidad y maleabilidad. El itrio es más abundante en la corteza terrestre, sin embargo, su producción y aplicación pueden incrementar la probabilidad de la liberación de nanopartículas en ambientes acuáticos, lo cual constituye un riesgo para la fauna y flora acuática. El propósito de este estudio fue desarrollar un adsorbente oxidado con TEMPO a partir del raquis de banano Cavendish, con el fin de recuperar itrio en soluciones acuosas. El proceso tuvo inicio con la recepción del raquis de banano, seguido por su troceado, lavado, secado y posterior molienda y tamizado para obtener un polvo fino. El material obtenido fue oxidado con el reactivo TEMPO, para incrementar sus grupos funcionales, los cuales, permiten mejorar la capacidad de adsorción. Para evaluar la aplicabilidad del material, se llevaron a cabo estudios de pH, estudios de equilibrio utilizando los modelos de las isotermas de Langmuir y Freundlich, y estudio cinético con los modelamientos matemáticos de Pseudo primer orden (PPO) y Pseudo segundo orden (PSO). Para el estudio de pH, la solución fue ajustada a valores de 4 y 5 por duplicado, bajo las siguientes condiciones: solución de 50 ppm de itrio con soluciones de  $HNO_3$  y  $NaOH$ , para luego ser colocados en agitación mecánica por 24 horas a temperatura ambiente. Donde finalmente el análisis del pH reveló que el proceso de adsorción de itrio con el material (RBT) mostró una capacidad de adsorción del 46.123% a pH 4, superando la observada a pH 5. En cuanto al análisis de isotermas, se emplearon los modelos de Langmuir y Freundlich. Según el modelo de Langmuir, la capacidad máxima de adsorción de itrio por RBT alcanzó los  $244.143 \text{ mg.g}^{-1}$ , mientras que el modelo de Freundlich mostró una capacidad de adsorción de  $3.195 \text{ mg.g}^{-1}$ . El modelo de Langmuir se ajustó mejor a los datos experimentales, con un coeficiente de correlación ( $R^2$ ) de 0.914. Para el análisis cinético, se utilizaron los modelos de Pseudo Primer Orden (PPO) y Pseudo Segundo Orden (PSO). Donde la capacidad de adsorción de RBT para la recuperación de itrio se determinó como  $21.809 \text{ mg.g}^{-1}$  bajo el modelo de PPO y  $22.284 \text{ mg.g}^{-1}$  bajo el modelo de PSO. Los resultados mostraron que el modelo de PSO se ajustó mejor a los datos experimentales, con un coeficiente de correlación ( $R^2$ ) de 0.964. Estos resultados fueron comparados con estudios sobre adsorción de iones de cobre (II) y  $Cd^{+2}$ , donde el modelo de PSO demostró un comportamiento apropiado, mostrando coeficientes de correlación ( $R^2$ ) elevados y una descripción precisa de la cinética de adsorción. La presente investigación, indica que este estudio analiza el comportamiento del proceso de adsorción de itrio  $Y^{+3}$  con el material RBT en función del pH, isotermas y

cinética, proporcionando información valiosa sobre la eficacia y el mecanismo de adsorción para su aplicación en la recuperación selectiva de itrio en soluciones acuosas.

**PALABRAS CLAVE:** Adsorción, Itrio, raquis de banano, TEMPO.

## ABSTRACT

Yttrium ( $Y^{+3}$ ) is one of the rare earth elements (REE) recognized for its silvery, shiny appearance and properties such as lightness, ductility and malleability. Yttrium is most abundant in the Earth's crust, however, its production and application can increase the probability of the release of nanoparticles in aquatic environments, which constitutes a risk for aquatic fauna and flora. The purpose of this study was to develop a TEMPO-oxidized adsorbent from Cavendish banana rachis, in order to recover yttrium in aqueous solutions. The process began with the reception of the banana rachis, followed by its cutting, washing, drying and subsequent grinding and sieving to obtain a fine powder. The material obtained was oxidized with the TEMPO reagent, to increase its functional groups, which allow improving the adsorption capacity. To evaluate the applicability of the material, pH studies, equilibrium studies using the Langmuir and Freundlich isotherm models, and a kinetic study with the mathematical modeling of Pseudo first order (PPO) and Pseudo second order (PSO) were carried out. For the pH study, the solution was adjusted to values of 4 and 5 in duplicate, under the following conditions: 50 ppm yttrium solution with  $HNO_3$  and NaOH solutions, and then placed under mechanical stirring for 24 hours at room temperature. Where finally the pH analysis revealed that the yttrium adsorption process with the material (RBT) showed an adsorption capacity of 46.123% at pH 4, exceeding that observed at pH 5. Regarding the isotherm analysis, the Langmuir and Freundlich models were used. According to the Langmuir model, the maximum adsorption capacity of yttrium by RBT reached  $244.143 \text{ mg.g}^{-1}$ , while the Freundlich model showed an adsorption capacity of  $3.195 \text{ mg.g}^{-1}$ . The Langmuir model fit the experimental data best, with a correlation coefficient ( $R^2$ ) of 0.914. For the kinetic analysis, the Pseudo First Order (PPO) and Pseudo Second Order (PSO) models were used. Where the adsorption capacity of RBT for yttrium recovery was determined as  $21.809 \text{ mg.g}^{-1}$  under the PPO model and  $22.284 \text{ mg.g}^{-1}$  under the PSO model. The results showed that the PSO model fit the experimental data better, with a correlation coefficient ( $R^2$ ) of 0.964. These results were compared with studies on adsorption of copper (II) and  $Cd^{+2}$  ions, where the PSO model demonstrated appropriate behavior, showing high correlation coefficients ( $R^2$ ) and an accurate description of the adsorption kinetics. The present investigation indicates that this study analyzes the behavior of the adsorption process of yttrium  $Y^{+3}$  with the RBT material as a function of pH, isotherms and kinetics, providing valuable information on the efficiency and adsorption mechanism for its application in recovery. selective yttrium in aqueous solutions.

**KEYWORDS:** Adsorption, Yttrium, banana rachis, TEMPO.

## CONTENIDO

DEDICATORIA .....	3
AGRADECIMIENTO .....	4
RESUMEN .....	5
ABSTRACT .....	7
CONTENIDO.....	9
ÍNDICE DE GRÁFICAS .....	11
ÍNDICE DE FIGURAS .....	12
ÍNDICE DE TABLAS .....	13
ÍNDICE DE DIAGRAMAS.....	14
ÍNDICE DE ANEXOS.....	15
LISTADO DE ABREVIATURAS.....	16
INTRODUCCIÓN.....	17
OBJETIVOS.....	19
Objetivo General .....	19
Objetivos Específicos.....	19
1. MARCO TEÓRICO.....	20
1.1 Tierras raras .....	20
1.1.1 Generalidades .....	20
1.1.2 Problemas ambientales causados por Tierras raras .....	20
1.1.3 Comercialización de Tierras raras.....	21
1.2 Itrio.....	21
1.2.1 Propiedades fisicoquímicas del itrio .....	21
1.2.2 Itrio como elemento contaminante.....	22
1.3 Residuos lignocelulósicos.....	23
1.3.1 Composición química .....	24
1.4 Banano .....	26
1.4.1 Producción de banano. ....	26
1.4.2 Raquis de banano.....	28
1.5 Oxidación con TEMPO.....	29
1.6 Adsorción .....	30
1.6.1 Materiales adsorbentes .....	30
1.6.2 Propiedades .....	31
1.6.3 Bioadsorción.....	32
1.6.4 Determinación de pH.....	32
1.6.5 Isotermas de adsorción.....	32

2. METODOLOGÍA .....	37
2.1 Sujeto o unidad de análisis.....	37
2.1.1 Sujeto o Unidad de análisis .....	37
2.1.2 Elementos clave .....	37
2.1.3 Ubicación.....	37
2.2 Materiales y métodos .....	37
2.2.1 Materiales, reactivos y equipos .....	37
2.2.2 Métodos .....	39
2.3 Procesos de recolección y análisis de los datos .....	43
2.3.1 Proceso de Recolección.....	43
2.3.2 Análisis de los datos. ....	43
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	44
3.1 Estudio de pH .....	44
3.2 Estudio de Isotermas.....	45
3.2.1 Isotherma de Langmuir .....	45
3.2.2 Isotherma de Freundlich .....	45
3.3 Estudio Cinético.....	47
3.3.1 Modelo cinético de Pseudo primer orden PPO.....	47
3.3.2 Modelo cinético de Pseudo segundo orden PSO .....	47
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	50
4.1 Conclusiones .....	50
4.2 Recomendaciones .....	50
BIBLIOGRAFÍA.....	51
ANEXOS .....	57

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

<b>Gráfica 1.</b> <i>Porcentaje de producción interna de banano</i> .....	26
<b>Gráfica 2.</b> <i>Porcentajes de exportación de banano hacia los principales países del mundo</i> .....	27
<b>Gráfica 3.</b> <i>Porcentajes de adsorción por cada pH</i> .....	44
<b>Gráfica 4.</b> <i>Isoterma de Laungmuir</i> .....	45
<b>Gráfica 5.</b> <i>Isoterma de Freundlich</i> .....	46
<b>Gráfica 6.</b> <i>Modelo cinético PPO</i> .....	47
<b>Gráfica 7.</b> <i>Modelo cinético PSO</i> .....	48

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Marco de lignocelulosa; celulosa: hemicelulosa y lignina .....	24
<b>Figura 2.</b> Morfología del Banano.....	27
<b>Figura 3.</b> Desechos de banano por cada planta de banano: BR, BPS y BP .....	29
<b>Figura 4.</b> Proceso de adsorción .....	31
<b>Figura 5.</b> Ubicación de la bananera .....	37

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> <i>Propiedades fisicoquímicas del Itrio.....</i>	22
<b>Tabla 2.</b> <i>Contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina en materiales lignocelulósicos. ....</i>	24
<b>Tabla 3.</b> <i>Composición de Fibra del Raquis de Banano.....</i>	28
<b>Tabla 4.</b> <i>Reactivos, materiales y equipos utilizados en el trabajo de Investigación.....</i>	38
<b>Tabla 5.</b> <i>Datos experimentales de adsorción del RBT.....</i>	44
<b>Tabla 6.</b> <i>Resultados del estudio de isothermas de cada modelo matemático. ....</i>	46
<b>Tabla 7.</b> <i>Resultados del estudio de cinética por cada modelo matemático. ....</i>	48

## ÍNDICE DE DIAGRAMAS

<b>Diagrama 1.</b> <i>Proceso de obtención del polvo de raquis</i> .....	39
<b>Diagrama 2.</b> <i>Precursores de Raquis de banano oxidado</i> .....	40
<b>Diagrama 3.</b> <i>Oxidación de RBT</i> .....	41
<b>Diagrama 4.</b> <i>Estudio de pH</i> .....	42
<b>Diagrama 5.</b> <i>Estudio de isoterms</i> .....	42
<b>Diagrama 6.</b> <i>Estudio de cinética</i> .....	43

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>Anexo 1.</b> Troceado y lavado del raquis de banano.....	57
<b>Anexo 2.</b> <i>Secado y posterior Molienda del Raquis de banano</i> .....	57
<b>Anexo 3.</b> <i>Tamizado y obtención de polvo de raquis</i> .....	57
<b>Anexo 4.</b> Precursores de Raquis de banano oxidado .....	58
<b>Anexo 5.</b> Muestras a pH 4 y 5, filtradas para mediciones en el ICP .....	59
<b>Anexo 6.</b> Diluciones de las muestras de isotermas para mediciones en el ICP.....	59

## LISTADO DE ABREVIATURAS

**ERR:** Elementos de tierras raras

**HRRE:** Elementos de tierras raras pesadas

**LREE:** Elementos de tierras raras ligeras

**Y:** Itrio

**BW:** Desechos de banano

**BRT:** Raquis de Banano

**BPS:** Pseudotallo de banano

**BP:** Cáscara de banano

**EC:** Espumas de carbón

**ECT:** Espumas de carbón modificadas con tempo

**ER:** Espumas de raquis

**RBT:** Raquis de banano oxidado con tempo

**PEG:** Polietilenglicol

**PRF:** Polvo de raquis fino

**CMC:** Carboximetilcelulosa

**NM:** Nanómetro

**UM:** Micrómetro

**PPM:** Partes por millón

**PPB:** Partes por mil millones

**ICP:** Espectrómetro de emisión atómica acoplado inductivamente

**PPO:** Modelo cinético pseudo de Primer orden

**PSO:** Modelo cinético pseudo de Segundo Orden

**IP:** Intrapartícula

**PRF:** Polvo de Raquis Fino

**RB:** Raquis de banano

## INTRODUCCIÓN

Los elementos de “tierras raras” (REE), denominados así porque se pensaba que su presencia no era común. Incluyen los elementos lantánidos (La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb y Lu), junto con Sc e Y. Estos últimos se incluyen en esta categoría debido a su presencia común en depósitos minerales junto a los lantánidos y a sus propiedades químicas similares.<sup>1</sup> Donde el itrio, es el que más destaca debido a su versatilidad química y su presencia en diversas aplicaciones como láseres, superconductores, electrodos y LED.<sup>2</sup>

En Ecuador, el banano en el año 2016 fue el producto que lideró la exportación global con un 19.6673 de cultivo y una producción de 314.437.040 cajas. A pesar de este éxito, las pérdidas postcosecha que oscilan entre el 10 % y 80 % debido a daños mecánicos, plagas y otros factores, representan un desafío. La fruta no exportable se usa en la agroindustria local y como alimento para animales. Tras aprovecharla, se originan subproductos o desechos lignocelulósicos como el raquis del banano, fundamental para sostener el racimo durante la cosecha.<sup>3</sup> Estos desechos se acumulan en puntos de recolección y mercados agrícolas, con una gestión inadecuada y generando preocupaciones económicas, sociales y ambientales. La falta de reciclaje adecuado incrementa el problema, provocando emisiones de gases de efecto invernadero, contaminación del suelo y agua, afectando la biodiversidad y la salud pública. La concienciación y políticas sostenibles son cruciales para mitigar estos impactos negativos.<sup>45</sup>

El raquis de plátano es considerado uno de los biosorbentes más efectivos, sobresaliendo por su destacada capacidad de adsorción y como un recurso biológico innovador, renovable y altamente eficiente para la adsorción de elementos de Tierras raras (REE).<sup>6</sup>

La bioadsorción implica el uso de materiales biológicos, naturales, que presenten propiedades absorbentes de metales para reducir concentraciones de iones metálicos<sup>7</sup> ya que la contaminación por metales pesados conlleva consecuencias severas para todos los seres vivos, desencadenando enfermedades catastróficas, declive económico, entre otros problemas. Este método, reconocido como estrategia para mitigar la contaminación, destaca no solo por su eficacia sino también por su asequibilidad económica.<sup>8</sup>

Las espumas de carbono son un material adsorbente que han ganado interés como alternativa ligera y con propiedades destacadas en comparación con las opciones convencionales.<sup>9</sup> Su estructura abierta y área específica ampliada facilitan la activación

mediante agentes específicos, incrementando los poros en la superficie celular.<sup>10</sup> Generalmente son reconocidas por su alto contenido de carbono, estas espumas tienen diversas aplicaciones térmicas, eléctricas y mecánicas, donde su baja densidad, capacidad para resistir altas temperaturas y versatilidad en sus conductividades eléctricas y térmicas varían según la metodología empleada para su obtención.<sup>9</sup> Esta investigación tiene como objetivo abordar la contaminación causada por el itrio, un agente problemático global. Este estudio se centra en la obtención de espumas de carbón a partir de residuos lignocelulósicos (raquis de banano), aprovechando sus propiedades adsorbentes para la recuperación del itrio en soluciones acuosas, que involucrará determinación de pH, isoterma, cinética y desorción, con el fin de encontrar soluciones sostenibles para mitigar el impacto ambiental del itrio.

## OBJETIVOS

### Objetivo General

Obtener un material adsorbente oxidado con tempo a partir del raquis de banano para la recuperación de Itrio en soluciones acuosas.

### Objetivos Específicos

- Obtener raquis de banano a partir de la especie de banano *Cavendish*.
- Oxidar el raquis de banano con TEMPO (RBT) para incrementar sus propiedades adsorbentes.
- Aplicar el proceso de adsorción al material RBT para la recuperación de itrio en soluciones acuosas.

## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1 Tierras raras

*1.1.1 Generalidades.* Los diecisiete elementos químicos, conocidos como REE, constituyen un grupo destacado en la tabla periódica. El escandio y el itrio se incluyen en esta categoría debido a su presencia común en depósitos minerales junto a los lantánidos y a sus propiedades químicas similares.<sup>1</sup>

Los elementos de tierras raras (REE) no solo se sustituyen mutuamente en la estructura mineral, sino que también coexisten en distintas estructuras en un mismo depósito, lo que complica su separación. Este proceso resulta desafiante ambiental y económicamente. Menos del 1% de los REE se reciclan debido a las dificultades para recolectar diversos productos finales y separarlos de otros metales o contaminantes.<sup>11</sup> Aunque todos los REE existen en la naturaleza, no se encuentran en forma de metal puro, estos elementos, apreciados por sus propiedades magnéticas, fosforescentes y catalíticas únicas, desempeñan un papel esencial en diversas tecnologías, desde dispositivos electrónicos hasta energía renovable, configurando una importancia crucial en nuestro panorama tecnológico actual.<sup>1</sup>

*1.1.2 Problemas ambientales causados por Tierras raras.* Recientemente, las tierras raras han recibido notable atención debido a su papel crucial en aplicaciones de alta tecnología y energía limpia. Aunque las operaciones para obtener estos elementos causan daños ambientales significativos, hay una falta de investigaciones exhaustivas sobre el ciclo de vida, especialmente en lo que respecta a la reducción de compuestos de tierras raras para la producción de aleaciones y metales de tierras raras.<sup>1</sup>

La obtención y tratamiento de tierras raras generan impactos ambientales, principalmente con residuos con materiales radioactivos que contaminan aguas subterráneas y afectan la calidad del suelo para la agricultura. Este problema ambiental acentúa la dificultad en la separación de los elementos de tierras raras (REE), contribuyendo a la baja tasa de reciclaje, que actualmente es inferior al 1%, debido a los desafíos asociados con la recolección de diversos productos finales y la separación de REE de otros metales o contaminantes.<sup>12</sup>

*1.1.3 Comercialización de Tierras raras.* El desafío de la comercialización de tierras raras radica en lograr un equilibrio óptimo entre la demanda del mercado y la abundancia natural de elementos de tierras raras (REE) en los minerales, conocido como el Problema de Equilibrio. La meta es una armonía precisa entre la demanda del mercado y la producción de REE, evitando excedentes. Para enfrentar esto, la industria de tierras raras busca nuevos usos para los REE en exceso y alternativas para aquellos con disponibilidad limitada o gran demanda.<sup>13</sup>

China, que posee alrededor de un tercio de las reservas globales de tierras raras, ha emergido como líder en este sector. Esta posición dominante se consolidó tras el descubrimiento de nuevas reservas en la década de los sesenta y al superar a los Estados Unidos a principios de los años noventa como el principal productor mundial de estos elementos. Aunque actualmente China disfruta de un monopolio en estos recursos estratégicos, la creciente demanda interna está empezando a limitar su control a largo plazo, marcando el inicio de una diversificación en la producción.<sup>14</sup>

## **1.2 Itrio**

El itrio, perteneciente al grupo de las tierras raras, destaca por su versatilidad química y su presencia en diversas aplicaciones. Desde su descubrimiento en el siglo XVIII, ha sido empleado en láseres, superconductores, electrodos y LED. Su utilidad se ha expandido a aplicaciones médicas. Con número atómico 39, es clasificado como metal de transición con configuración electrónica  $[\text{Kr}] 4d_1 5s_2$ . A diferencia de metales preciosos como oro y plata, el itrio es más común en la corteza terrestre y se encuentra en minerales de tierras raras. Aislado en 1828, actualmente se obtiene mediante disolución en ácido sulfúrico y fraccionamiento de iones metálicos mediante cromatografía de intercambio iónico.<sup>2</sup>

*1.2.1 Propiedades fisicoquímicas del itrio.* Itrio, uno de los elementos de las tierras raras, caracterizado por su tonalidad plateada, brillo destacado, ligereza, ductilidad y maleabilidad,<sup>12</sup> fue descubierto en 1794 por el mineralogista y químico finlandés Johan Gadolin, este elemento se halló en una roca oscura denominada Gadonilita, compuesta por cerio, lantano y hierro.<sup>14</sup>

Asimismo, exhibe un punto de ebullición de 3609 K (3336 °C) y una densidad de 4472 kg/m<sup>3</sup> (4.47 g/ml). Este elemento presenta alta propensión a la oxidación y se encuentra en abundancia en la corteza terrestre,<sup>12</sup> por lo que no son realmente escasos, sin embargo, se distribuyen en diversos tipos de depósitos y ubicaciones específicas.<sup>14</sup>

En la tabla 1, se detallan las propiedades fisicoquímicas del itrio.

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas del Itrio

Símbolo	Itrio (Y)
Número atómico	39
Descubrimiento	1794 – Johan Gadolin
Densidad	4472 kg/m <sup>3</sup> (4.47 g/ml)
Punto de ebullición	3609 K (3336 °C)
Propensión a oxidación	Alta
Tonalidad	Plateada
Maleabilidad	Alta
Ductilidad	Alta

Fuente: <sup>12 14</sup>

*1.2.2 Itrio como elemento contaminante.* La contaminación ambiental surge del rápido aumento del itrio, utilizado en forma de óxido de itrio (Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) en síntesis, materiales aditivos y blindaje para altas temperaturas/infrarrojo. Esta aplicación específica intensifica las preocupaciones sobre la posibilidad de liberación intencional o involuntaria al medio ambiente, lo que podría tener repercusiones adversas para la salud humana y el equilibrio ecológico. A pesar de la limitada comprensión actual de los impactos ambientales del nY<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, especialmente en organismos acuáticos, la utilización extendida de estas nanopartículas presenta riesgos significativos y desconocidos para la salud humana y ambiental. La producción y aplicación de óxido de itrio en diversas formas aumentan la probabilidad de la liberación de nanopartículas en ambientes acuáticos, generando peligros imprevistos para los organismos acuáticos.<sup>15</sup>

*1.2.3 Aplicación industrial del itrio.* El itrio destaca como el elemento dominante en minerales ricos en Tierras raras pesadas (HREE), como la xenotima y la adsorción de iones, a diferencia del cerio, que predomina en minerales ricos en Elementos de tierras raras ligeras (LREE) como bastnäsita y monacita. Aunque las cantidades de itrio son limitadas en comparación con el cerio, su importancia radica en aplicaciones industriales, como lámparas de fósforo e imanes permanentes.<sup>13</sup> Además, el itrio, en forma de óxido, desempeña un papel clave como fósforo fluorescente, dopado con europio. En su estado metálico, tiene la capacidad de absorber hidrógeno y se asemeja

a diversos metales. Los granates de itrio-aluminio son utilizados en joyería y láseres, mientras que el itrio-hierro se emplea en transmisores y transductores.<sup>16</sup>

El "Problema de Equilibrio" se presenta al intentar satisfacer la demanda específica de cada REE para aplicaciones críticas, afectando la producción y los costos. La evolución tecnológica complica aún más la búsqueda de un equilibrio en el mercado, especialmente cuando ciertas aplicaciones requieren REE puros, como en el caso de fósforos para lámparas. En el pasado, aplicaciones más antiguas, como mischmetal, podían consumir mezclas de REE sin necesidad de separación, pero la introducción de REE purificados para ciertas aplicaciones ha ampliado la complejidad del equilibrio en el mercado.<sup>13</sup>

### **1.3 Residuos lignocelulósicos**

En los últimos años, los desechos lignocelulósicos han atraído la atención debido a preocupaciones económicas, sociales y ambientales,<sup>5</sup> así como al cambio climático y la reducción de los combustibles fósiles. La gestión inapropiada de estos materiales genera problemas económicos, sociales y ambientales a nivel mundial.<sup>17</sup>

En respuesta a la seria consideración de problemas globales, la biomasa lignocelulósica de desechos agroindustriales destaca por ser renovable y una fuente única de bioenergía rentable. Las biotecnologías emergentes pueden mejorar la conversión y rendimiento de productos, diversificando recursos biológicos. Paralelamente, los materiales lignocelulósicos, valiosos y renovables, generados como subproductos agrícolas, han despertado interés por su potencial renovable y su importancia en sociedades industriales modernas. A pesar de su descarte frecuente, las biomásas lignocelulósicas se han vuelto destacadas por su naturaleza renovable y su creciente interés en la investigación.<sup>5</sup>

1.3.1 *Composición química.* La composición química esencial de los residuos lignocelulósicos, como desechos agrícolas y materiales leñosos, se caracteriza primordialmente por tres elementos: celulosa, hemicelulosa y lignina. Estos recursos vegetales poseen un considerable potencial para la generación de biocombustibles. En el caso de la biomasa lignocelulósica agrícola, la lignina representa alrededor del 10 al 25%, la hemicelulosa del 20 al 30%, y la celulosa del 40 al 50%. La variabilidad en la composición de la lignocelulosa se encuentra fuertemente influenciada por la fuente de origen, ya sea madera dura, madera blanda o pasto.<sup>5</sup>

En la tabla 2, se muestra los contenidos en materiales lignocelulósicos.

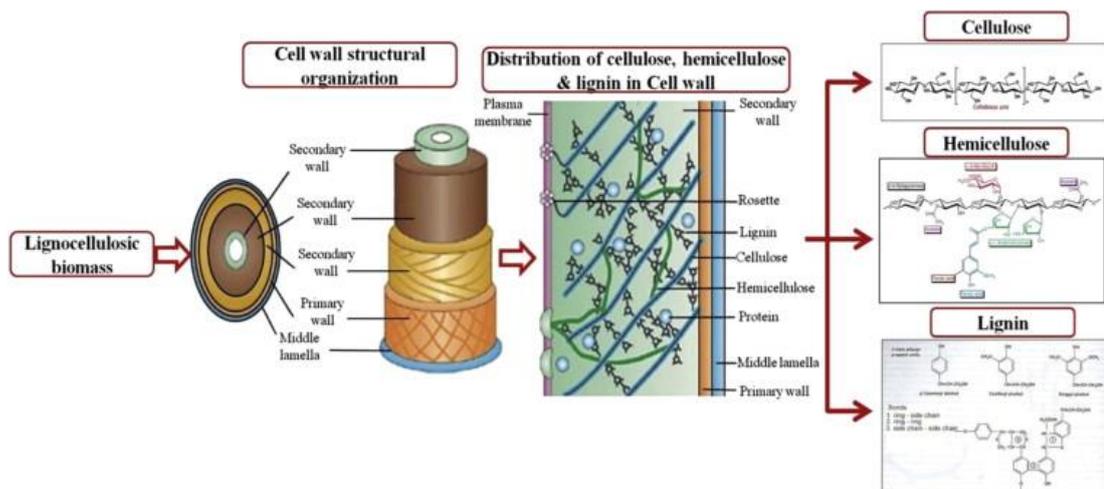
Tabla 2. Contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina en materiales lignocelulósicos

Material	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Lignina (%)
Madera dura	40-55	24-40	18-25
Madera blanda	45-50	25-35	25-35
Pasto	25-40	25-50	10-30
Residuo de plátano	13.2	14.8	14
Bagazo	54.87	16.52	23.33

Fuente:<sup>5</sup>

En la figura 1, se muestra el contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina.

Figura 1. Marco de lignocelulosa; celulosa: hemicelulosa y lignina



Fuente:<sup>5</sup>

1.3.1.1 *Celulosa.* La celulosa destaca como el polímero natural más abundante, renovable y capaz de biodegradarse,<sup>18</sup> que, además, constituye un componente crucial

en las paredes celulares vegetales, proporcionando resistencia mecánica, mientras que las macromoléculas de hemicelulosa suelen ser repeticiones de pentosas y hexosas.<sup>5</sup> En las fibras lignocelulósicas, la celulosa, que constituye aproximadamente el 45% de su composición, juega un papel esencial como componente estructural principal. Organizadas en fibrillas dentro de la matriz de lignina, estas fibrillas de celulosa, con un espesor de 3 a 4 nm, sobresalen por sus notables propiedades mecánicas. Además, presentan beneficios adicionales, como biocompatibilidad, transparencia y alta reactividad, atribuibles a los grupos hidroxilo en su extensa superficie. No obstante, la terminología utilizada para describir estas fibrillas de celulosa muestra falta de uniformidad, siendo comunes términos como celulosa microfibrilada, nanofibrillas de celulosa o nanofibras de celulosa.<sup>18</sup>

*1.3.1.2 Hemicelulosa.* Las hemicelulosas son tradicionalmente definidas como el componente soluble en álcali tras la remoción de las sustancias pépticas<sup>19</sup> y es considerado el segundo polímero heterogéneo más abundante.<sup>5</sup>

Su obtención implica una hidrólisis alcalina para liberarlas de la matriz lignocelulósica, seguida de su extracción en medio acuoso.<sup>19</sup>

Está compuesta principalmente por glucuronoxilano, glucomanano y trazas de otros polisacáridos. En pastos y paja encontramos arabinano, galactano y xilano, mientras que, en maderas duras, el manano destaca en la composición. Estos polisacáridos se clasifican como xitanos, mananos y glucanos, siendo los primeros dos los más prevalentes. En maderas duras, el glucuronoxilano predomina, con la xilopiranososa como columna vertebral. La biomasa hemicelulósica abarca entre un 25% y un 35% de hemicelulosa, con un peso molecular promedio inferior a 30.000. Se destaca la estrecha unión de la hemicelulosa a la celulosa en la superficie de cada microfibrilla, y aunque inicialmente se creía que las hemicelulosas eran intermediarias en la biosíntesis de la celulosa, su función es ahora más compleja.<sup>5</sup>

*1.3.1.3 Lignina.* La lignina, que constituye entre el 10% y el 25% de la biomasa total, es una fracción altamente compleja y compacta. Se compone mayoritariamente de un polímero heterogéneo de cadena larga, donde las unidades de fenilpropano están mayormente unidas por enlaces éter. La función principal de la lignina radica en actuar como un aglutinante, llenando los espacios entre la celulosa y la hemicelulosa en la biomasa vegetal. Aunque a menudo se considera un subproducto o residuo en la producción de bioetanol, la lignina desempeña un papel esencial. Su estructura incluye grupos metoxi y una sustancia polifenólica no carbohidrato, conectando los componentes de las paredes celulares.

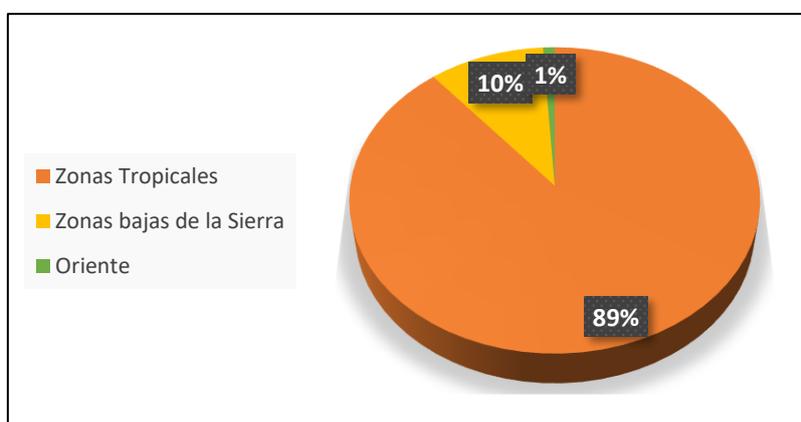
Los fenilpropanos, constituyentes fundamentales de la lignina, son unidades de 3 carbonos vinculadas a anillos de 6 átomos de carbono. Además, la lignina contiene alcoholes aromáticos como el coniferílico, sinapílico y p-cumarílico, generados en un proceso biosintético. Estos alcoholes forman una capa protectora alrededor de la celulosa y la hemicelulosa, contribuyendo a la integridad estructural de la biomasa vegetal.<sup>5</sup>

## 1.4 Banano

*1.4.1 Producción de banano.* Ecuador en el año 2016 había encabezado la exportación global de banano con 19.6673 ha. de cultivo y una producción de 317.437.040 cajas (promediando 18.14 kg cada una). El 89 % proviene de zonas tropicales, 10 % de zonas bajas de la Sierra y 1 % del Oriente, con un incremento del 6.5 % desde 2014.<sup>3</sup>

En la gráfica 1, se detalla estadísticamente la producción en diferentes regiones del Ecuador.

Gráfica 1. Porcentaje de producción interna de banano

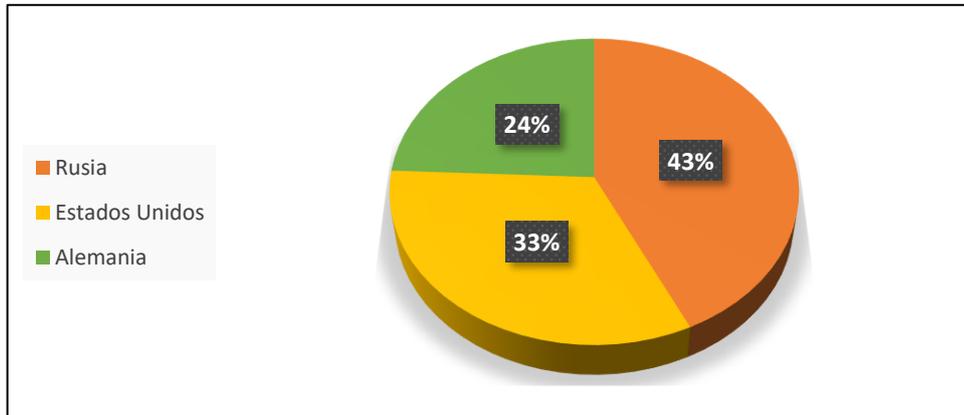


Fuente:<sup>3</sup>

Por otra parte, las exportaciones principales van a Rusia (20.3 %), Estados Unidos (15.5 %) y Alemania (11.5 %).<sup>3</sup>

En la gráfica 2, se detalla estadísticamente las exportaciones de banano a los principales países a nivel global.

Gráfica 2. Porcentajes de exportación de banano hacia los principales países del mundo.

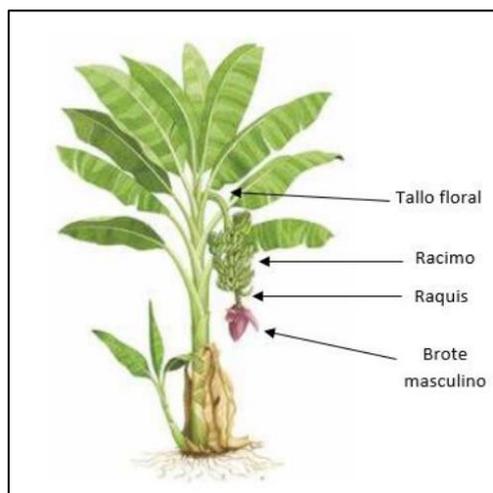


Fuente: <sup>3</sup>

En el mismo año el banano abarcó el 12.39 % del área agrícola de Ecuador, aportando el 2 % del PIB nacional y el 26 % del PIB agrícola, además de generar 2.5 millones de empleos entre directos e indirectos. En América Latina, se destacan exportaciones de banano orgánico, con Ecuador cultivando 19.000 ha y 360.000 toneladas anuales, dirigidas principalmente a Estados Unidos, Europa y Nueva Zelanda. Las pérdidas postcosecha oscilan entre el 10 % y el 80 % debido a daños mecánicos, plagas y otros factores. La fruta no exportable se utiliza en la agroindustria, alimentos para animales o el mercado local.<sup>3</sup>

En la Figura 2, se detalla la morfología del Banano.

Figura 2. Morfología del Banano



Fuente:<sup>20</sup>

1.4.2 *Raquis de banano*. Luego del aprovechamiento de los frutos, se generan subproductos como lo es el tallo floral de la planta de banano, conocido como raquis o pinzote, que desempeña un papel crucial al sostener el racimo de banano durante la cosecha, sin embargo, son acumulados en puntos de recolección y mercados de productos agrícolas.<sup>4</sup>

1.4.2.1 *Composición del raquis de banano*. Su composición principal comprende celulosa, hemicelulosa y lignina. Este raquis contiene alrededor del 5-8% de fibra, con una longitud de fibra aproximada de 2.86 mm. Las fibras naturales, como las presentes en el raquis de banano, consisten en fibrillas de celulosa densamente agrupadas en haces paralelos, unidas por hemicelulosa, pectina, extensina y, crucialmente, lignina, que aporta rigidez al conjunto.<sup>21</sup>

En la tabla 4, se detalla la composición de fibra del raquis de banano.

Tabla 3. Composición de Fibra del Raquis de Banano

Elementos	Porcentajes (%)
Agua	93
Materia Sólida	7

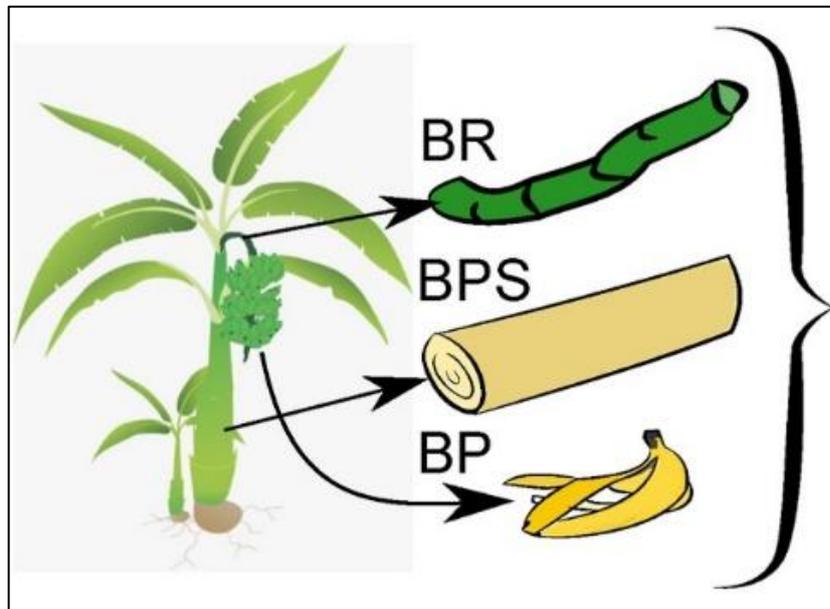
Fuente: <sup>22</sup>

Los residuos de las agroindustrias y todo material orgánico que proviene de animales y vegetales forman la biomasa lignocelulósica que se destina en su mayoría a generar energía. Su nuevo uso reduce gran cantidad de residuos y los problemas que ello conlleva al no recibir el tratamiento adecuado después de desecharlos. El 70% comprende polisacáridos de celulosa y hemicelulosa, junto a la lignina y alcoholes aromáticos.<sup>23</sup>

1.4.2.2 *Raquis del banano como material adsorbente*. Los restos provenientes de la planta de banano se destacan como valiosos materiales adsorbentes, siendo generados en cantidades significativas después de cada cosecha que se realiza aproximadamente cada 9 meses. Los desechos de banano (BW) comprenden diversas partes, como el raquis de banano (BR), el pseudotallo del banano (BPS), la cáscara de banano (BP) y las hojas. Por ellos, el raquis de banano se presenta como uno de los biosorbentes más efectivos, destacando por su notable capacidad de adsorción. Específicamente, el raquis de banano se posiciona como un recurso biológico innovador, renovable y altamente eficiente para la adsorción de elementos de Tierras raras (REE).<sup>6</sup>

En la figura 3, se muestran los diferentes tipos de desechos generados por cada planta de banano.

Figura 3. Desechos de banano por cada planta de banano: BR, BPS y BP



Fuente:<sup>6</sup>

### 1.5 Oxidación con TEMPO

TEMPO, el radical nitroxilo orgánico (2,2,6,6-tetrametilpiperidina-N-oxilo), destaca por sus diversas aplicaciones en la oxidación en procesos químicos industriales. La recuperación eficiente de TEMPO es una prioridad clave para preservar su alta actividad, abordando preocupaciones económicas y medioambientales. Su incorporación en diversos materiales de soporte, tanto orgánicos como inorgánicos, ha sido explorada para facilitar su recuperación y reutilización.<sup>24</sup>

Este radical nitroxilo participa en el proceso de oxidación, afectando la morfología de las fibras y modificando características como longitud y grosor. Aunque la flexibilidad en la oxidación con TEMPO es notable en el laboratorio, la eficiencia en la producción adquiere importancia en aplicaciones industriales. En la obtención de nanofibrillas de celulosa, optimizar el proceso es esencial para garantizar la calidad del producto final. Esto implica un control preciso de la consistencia del producto en términos de contenido de grupos carboxilo y morfología de las fibras.<sup>25</sup>

## 1.6 Adsorción

La adsorción, un fenómeno superficial en el que los adsorbatos se transfieren a los adsorbentes, ha experimentado una aplicación generalizada en las últimas décadas en el tratamiento de agua y aguas residuales. Esto se debe a sus atributos como bajo costo, eficiencia, simplicidad y su respeto por el medio ambiente. Los mecanismos de adsorción abarcan principalmente la adsorción química, que implica la formación de enlaces químicos, la adsorción física asociada a las fuerzas de van der Waals y el intercambio iónico.<sup>26</sup>

La adsorción química es un método que se basa en la retención de sustancias perjudiciales en la superficie de un material, ya sea a través de su retención en los poros o mediante reacciones químicas.<sup>27</sup> Así, en el transcurso de este proceso de adsorción química, se forma un sistema mecánico cuántico unificado entre la molécula adsorbida y la estructura sólida.<sup>28</sup>

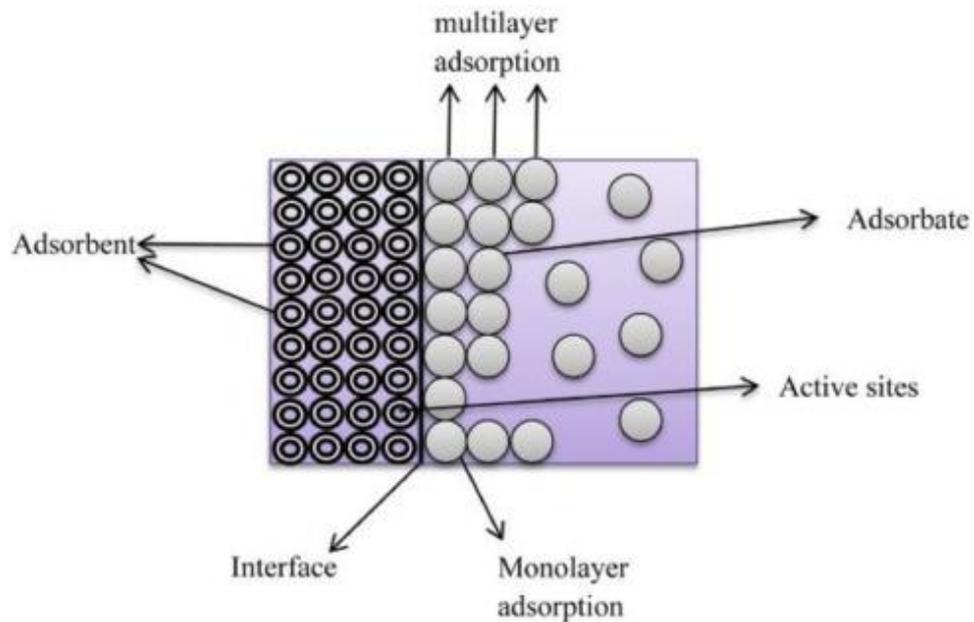
La adsorción física se manifiesta cuando un gas entra en contacto con la superficie de un sólido, denominado adsorbente. En este caso, se hace referencia a las sustancias retenidas en la superficie, llamadas adsorbato, marcando una distinción con el adsorbente que generalmente adopta la forma de un gas o vapor. Los métodos más comúnmente utilizados para llevar a cabo este proceso son los volumétricos y gravimétricos.<sup>29</sup>

*1.6.1 Materiales adsorbentes.* En los últimos tiempos, se han empleado ampliamente materiales adsorbentes obtenidos a partir de residuos agrícolas en la depuración de aguas residuales. Estos materiales presentan numerosas ventajas en comparación con sustancias tradicionales, como su bajo coste, alta eficiencia, capacidad de descomposición biológica y origen renovable. Como resultado, se han desarrollado varios adsorbentes altamente efectivos utilizando diversos tipos de residuos sólidos agrícolas, subproductos agrícolas y biomasa con el fin de tratar las aguas residuales.<sup>30</sup>

Estos mecanismos incluyen la interacción iónica y la formación de complejos entre los cationes metálicos (adsorbato) y los ligandos ubicados en la superficie del biosorbente. Debido a la composición celular, varios grupos funcionales pueden servir como ligandos, como carboxilos, fosfatos, aminas y otros. Esta técnica representa grandes ventajas en su proceso económico y ecológico, normalmente utiliza biomasa no viable y permite la reutilización de los adsorbentes después de liberar los metales, lo que reduce significativamente los costos.<sup>31</sup>

En la figura 4, se muestra el diagrama del proceso de adsorción.

Figura 4. Proceso de adsorción



Fuente: <sup>32</sup>

**1.6.2 Propiedades.** Las propiedades del adsorbente desempeñan un papel fundamental en el proceso de adsorción. Aspectos como el tamaño de partícula, el área superficial, la porosidad, las características fisicoquímicas de la superficie, la presencia de grupos funcionales, la composición elemental, las propiedades térmicas y el pH superficial influyen significativamente en este proceso. En particular, los adsorbentes no-convencionales que presentan una porosidad adecuada tienen la capacidad de atrapar y retener una amplia gama de moléculas, desde átomos hasta complejos colorantes. La estructura química de los tejidos vegetales, como tallos, hojas, cáscaras, semillas y raíces, exhibe cavidades y poros que son efectivos para capturar sustancias diversas, incluyendo metales y colorantes. Estas estructuras poliméricas naturales promueven interacciones altamente favorables entre los electrones libres de las especies, lo que convierte a los materiales naturales en opciones muy atractivas para la eliminación de contaminantes en el agua.<sup>33</sup>

*1.6.3 Bioadsorción.* La bioadsorción, una tecnología destinada al tratamiento de contaminantes acuosos en el medio ambiente, ha ganado considerable popularidad entre los investigadores en los últimos años. Este proceso implica el uso de materiales de origen biológico, es decir, naturales, que posean propiedades absorbentes de metales. Su objetivo es reducir las concentraciones de iones metálicos de niveles en partes por millón (ppm) a partes por mil millones (ppb).<sup>7</sup>

La contaminación por metales pesados tiene consecuencias severas para todos los seres vivos, dando lugar a enfermedades catastróficas, declive económico, entre otros problemas. La bioadsorción, identificada como uno de los métodos para mitigar la contaminación, destaca no solo por su eficacia, sino también por su bajo costo. Es especialmente empleado en el tratamiento de grandes volúmenes de agua, utilizando biomasa muerta para superar la toxicidad en áreas contaminadas.<sup>8</sup>

*1.6.4 Determinación de pH.* El examen del pH constituye uno de los aspectos más cruciales en el proceso de adsorción. En una solución acuosa, el pH puede influir en las cargas superficiales del bioadsorbente, en la eliminación de iones metálicos, así como en el grado de ionización y concentración de los contraiones de los grupos funcionales presentes en el bioadsorbente. Cuando el pH es bajo, la capacidad de adsorción de iones metálicos disminuye, ya que la presencia excesiva de iones de H<sup>+</sup> compite con los iones metálicos por los sitios activos.

La determinación del pH es fundamental para comprender y controlar la interacción entre el bioadsorbente y los contaminantes en una solución acuosa. Este parámetro no solo influye en las características superficiales del bioadsorbente, sino que también desempeña un papel crucial en la competencia por los sitios de adsorción entre los iones de hidrógeno y los iones metálicos.<sup>34</sup>

*1.6.5 Isotermas de adsorción.* En el proceso de adsorción, las moléculas del adsorbato inician su adhesión a la superficie del sólido (adsorbente) con una velocidad determinada, al mismo tiempo que las moléculas previamente adsorbidas comienzan a liberarse. A medida que transcurre el tiempo, la velocidad de adsorción disminuye, mientras que la velocidad de desorción aumenta, alcanzando eventualmente un equilibrio dinámico en el que la cantidad de moléculas adsorbidas iguala a las moléculas resorbidas en la superficie.<sup>35</sup>

Este equilibrio, conocido como isotermas de adsorción cuando la temperatura permanece constante, es llevado a cabo en un volumen específico de solución que contiene una cantidad conocida de adsorbato, en combinación con distintas cantidades de adsorbente. Una vez alcanzado el equilibrio, se mide la concentración del adsorbato

en la fase acuosa, y la capacidad de adsorción se determina mediante un balance de masa.<sup>36</sup>

En la ecuación 1, se observa la fórmula para determinar la capacidad de adsorción de materiales adsorbentes.

$$Q_e = \frac{V \cdot (C_o - C_e)}{m} \quad ( 1 )$$

Donde:

Q<sub>e</sub>: Capacidad de adsorción (mg adsorbato/ g de adsorbente)

C<sub>o</sub>: Concentración inicial del adsorbato (mg/L)

C<sub>e</sub>: Concentración en el equilibrio (mg/L)

m: Cantidad de adsorbente (g)

V: Volumen de solución (L)

Existen diversos modelos de isotermas utilizados para evaluar la capacidad de adsorción, entre los cuales se incluyen Langmuir, Freundlich, Redlich-Peterson, Koble-Corrigan, Sips, Toth, Temkin y Dubinin-Radushkevich,<sup>37</sup> sin embargo, los más usuales y ampliamente utilizados para analizar los datos de equilibrio son los modelos de Langmuir y Freundlich.<sup>36</sup>

*1.6.5.1 Isotermas Langmuir.* La Isoterma Langmuir fue la primera isoterma desarrollada,<sup>35</sup> que se aplican a procesos de adsorción que tienen lugar en sitios específicos del biosorbente. Este modelo sugiere que la superficie del adsorbente está compuesta por pequeños "parches" de adsorción con equivalencia energética entre ellos con respecto al fenómeno de adsorción, como se expresa en su forma lineal.<sup>38</sup>

En la ecuación 2, se observa la fórmula para determinar la capacidad de adsorción que tienen lugar en sitios específicos del biosorbente.

$$Q_e = \frac{q_{max} \cdot C_e \cdot K}{1 + K \cdot C_e} \quad ( 2 )$$

Donde:

Q<sub>e</sub>: Capacidad de adsorción (mg adsorbato/g de adsorbente)

C<sub>e</sub>: Concentración en el equilibrio (mg/L)

q<sub>max</sub>: Máxima capacidad de adsorción (mg adsorbato/ g de adsorbente)

K: Constante de adsorción de Langmuir (L/mg)

*1.6.5.2 Isotermas Freundlich.* La mayoría de las investigaciones actuales que se centran en la interpretación de datos experimentales mediante la isoterma de Freundlich pasan por alto que los datos recolectados en regiones de baja y moderada concentración/presión de adsorbato pueden ser analíticamente continuos dentro del modelo de adsorción de Freundlich hasta alcanzar la saturación de adsorción.<sup>39</sup> Este modelo, que se presenta como un enfoque empírico, se utiliza para describir sistemas heterogéneos, ofreciendo una expresión que caracteriza eficazmente dichos sistemas.<sup>36</sup>

En la ecuación 3, se observa la fórmula para determinar la capacidad de adsorción que tiene lugar en el adsorbato.

$$Q_e = K_f (C_e^{1/n}) \quad (3)$$

Donde:

q<sub>e</sub>: Capacidad de adsorción (mg adsorbato/ g de adsorbente)

K<sub>f</sub> y n: Constantes de Freundlich que representan la capacidad y la intensidad de adsorción, respectivamente.

C<sub>e</sub>: Concentración en el equilibrio (mg/L)

*1.6.6 Cinética de adsorción.* Al considerar un sistema de adsorción, el parámetro crucial es la cinética de adsorción, La cinética de adsorción es una representación gráfica que muestra la velocidad de retención o liberación de un soluto desde un medio acuoso hacia la interfaz sólida, considerando dosis de adsorbente, temperatura, caudal y pH específicos y que además determina la velocidad del proceso. Esta cinética se ve afectada por la complejidad de la superficie del adsorbente, la concentración del soluto y el flujo. Tipos de cinéticas, como pseudoprimer orden (PFO), pseudosegundo orden (PSO), Elovich e intrapartícula (IP), se utilizan para prever la interacción entre el adsorbente y el adsorbato. De estos, los modelos pseudoprimer y pseudosegundo orden son ampliamente aplicados en diversos procesos de sorción.<sup>40</sup>

*1.6.6.1 Modelo cinético pseudo de primer orden (PFO).* El modelo cinético pseudo de primer orden (PFO), conocido también como modelo de Lagergren, constituye una

descripción de la adsorción de un soluto en un adsorbente, basándose en un mecanismo de primer orden. Este modelo se aplica de manera particular en situaciones donde la adsorción sigue el régimen de adsorción de Henry y cuando se emplean dosis significativas de adsorbente. El PFO ofrece una representación matemática que relaciona la velocidad de adsorción con la cantidad de soluto adsorbido, permitiendo entender y predecir el comportamiento del proceso en condiciones específicas de dosis, temperatura y concentración del soluto en el medio acuoso.<sup>40</sup>

La ecuación 4, expresa el modelo cinético de primer orden:

$$Q_t = \left( Q_e (1 - \exp^{-k_1(t)}) \right) \quad (4)$$

Donde:

$Q_t$ : Cantidad o capacidad de soluto adsorbido (mg adsorbato/ g de adsorbente).

$Q_e$ : Cantidad o capacidad de adsorción en equilibrio (mg adsorbato/ g de adsorbente).

$K_1$ : Constante de la velocidad de adsorción de Pseudo de primer orden (min/L).

$t$ : tiempo (min).

*1.6.6.2 Modelo cinético pseudo de segundo orden (PSO).* El modelo pseudo de segundo orden (PSO) considera que la velocidad de adsorción del soluto es proporcional a los sitios disponibles en el adsorbente. La velocidad de reacción, que depende de la cantidad de soluto en la superficie del adsorbente, se expresa mediante la fuerza impulsora ( $q_{mi} - q_t$ ), siendo proporcional al número de sitios activos disponibles. Aunque el PSO puede verse afectado por factores como el pH, la cantidad de dosis, el tamaño de las partículas y la temperatura evalúa el impacto de los parámetros de velocidad observables. Este modelo se utiliza para determinar tanto la absorción inicial del soluto como la capacidad de adsorción del adsorbente. En las últimas dos décadas, se ha observado que el PSO se adapta mejor a los experimentos, a pesar de la conclusión equivocada que sugiere que el mecanismo de adsorción es de naturaleza quimisorción, implicando la transferencia de electrones entre el adsorbato y el adsorbente.<sup>40</sup>

La ecuación 5, expresa el modelo cinético pseudo de segundo orden.

$$Q_t = \frac{(K \cdot Q_e^2 \cdot t)}{(1 + (K2 \cdot Q_e \cdot t))} \quad ( 5 )$$

Donde

t: Tiempo de adsorción (min).

Qt: Capacidad de adsorción (mg adsorbato/ g de adsorbente).

Qe: Capacidad de adsorción en el equilibrio (mg adsorbato/ g de adsorbente).

k2: Constante de velocidad del modelo de pseudo segundo orden (g/mg\*min).

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Sujeto o unidad de análisis

#### 2.1.1 Sujeto o Unidad de análisis

- ✓ Raquis de banano

#### 2.1.2 Elementos clave

- ✓ Itrio
- ✓ Soluciones acuosas

2.1.3 *Ubicación.* El material para la producción de las espumas de carbón provino del raquis recopilado en la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Técnica de Machala, situada en El Cambio.

La figura 5 muestra una captura de Google maps del lugar donde se llevó a cabo la recolección de la muestra.

Figura 5. Ubicación de la bananera



Coordenadas: P35P+CCW, E583, El Cambio

Fuente: Google Maps

### 2.2 Materiales y métodos

2.2.1 *Materiales, reactivos y equipos.* Los reactivos, materiales y equipos utilizados en el presente trabajo de investigación, se describen en la tabla 4:

Tabla 4. Reactivos, materiales y equipos utilizados en el trabajo de Investigación

<b>Reactivos</b>	<b>Materiales</b>	<b>Equipos</b>
Agua destilada.	Bata de laboratorio.	Molino de cuchillas.
Polietilenglicol 4000 (PEG).	Mascarilla.	Tamiz vibratorio (RO-TAP).
Carboximetilcelulosa (CMC).	Vasos de precipitación de 25ml, 50ml, 250ml, 600ml, 1000ml.	Agitador orbital (INFORS HT CELLTRON).
Cloruro de sodio (NaCl, Pureza: 99,6%; Fisher Chemical: USA).	Balón volumétrico de 25ml, 50ml, 100ml, 250ml, 500ml, 1000ml.	Balanza analítica (SHIMADZU AUX 200).
Hidróxido de sodio (NaOH, Pureza: 98.8%; Fisher Chemical: USA).	Erlenmeyer de 250ml.	Estufa (MEMMERT VN6400 4051785).
Ácido nítrico (HNO <sub>3</sub> , Pureza: 68 a 70%; Fisher Chemical: USA).	Papel filtro.	Agitador digital con calefacción (CIMAREC).
Óxido de itrio (Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Pureza: 99%; Alfa Aesar: USA).	Pipetas graduadas.	pH-Metro (OHAUS STARTER 5000).
Solución de itrio (Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Pureza: 99%; Alfa Aesar: USA).	Pipetas volumétricas.	Campana de extracción (LABCONCO).
	Micropipetas.	Plancha de agitación (CIMAREC).
	Termómetro.	Mufla horizontal.
	Espátula.	Espectrómetro de emisión atómica acoplado inductivamente (ICP-OES).Modelo: Optima 8000; Marca: Perkin Elmer.
	Embudos.	
	Varilla de agitación.	
	Papel aluminio.	
	Frascos ámbar.	
	Vidrio de reloj.	
	Gradillas.	
	Tubos falcon.	
	Pera volumétrica.	
	Piseta.	
	Cápsulas de porcelana.	
	Fundas ziploc.	
	Jeringas.	

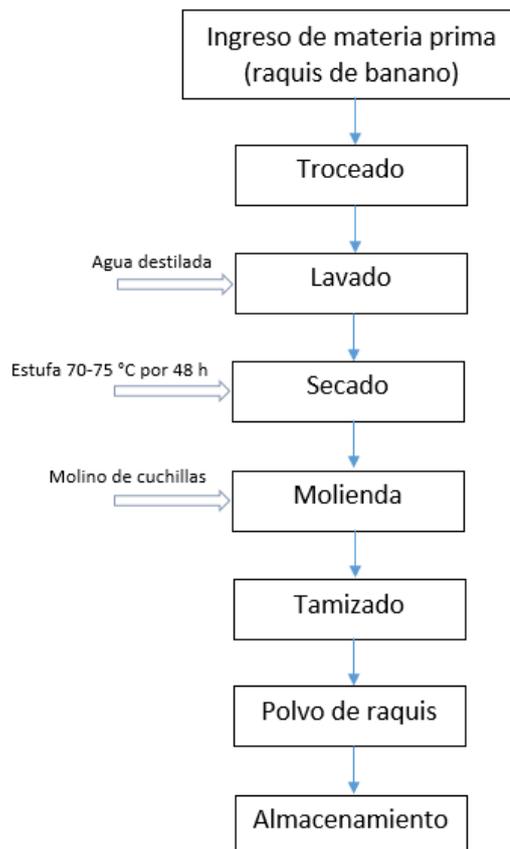
Fuente: Elaboración propia

## 2.2.2 Métodos

2.2.2.1 *Obtención de polvo de Raquis fino (PRF)*. Se procedió a pelar y cortar el raquis de banano en trozos pequeños y se procede lavarlos con agua destilada para eliminar cualquier impureza o contaminante. Luego se seca el exceso de agua y se colocan en charolas cubiertas con papel aluminio, a los cuales previamente se les hacen pequeños agujeros con una aguja, y se llevan a la estufa a una temperatura entre 70 y 75 °C por 3 días (evitar acumular demasiado raquis). Transcurrido ese tiempo, se revisa que no posean humedad, caso contrario, se dejan secar por otras 24 horas. Luego se lleva al molino de cuchillas para obtener polvo de raquis, el mismo que debe ser tamizado con un tamiz de 63  $\mu\text{m}$  y así obtener el polvo de raquis fino.<sup>41</sup>

En el diagrama 1, se presenta el diagrama de tratamiento preliminar del raquis de banano:

Diagrama 1. Proceso de obtención del polvo de raquis

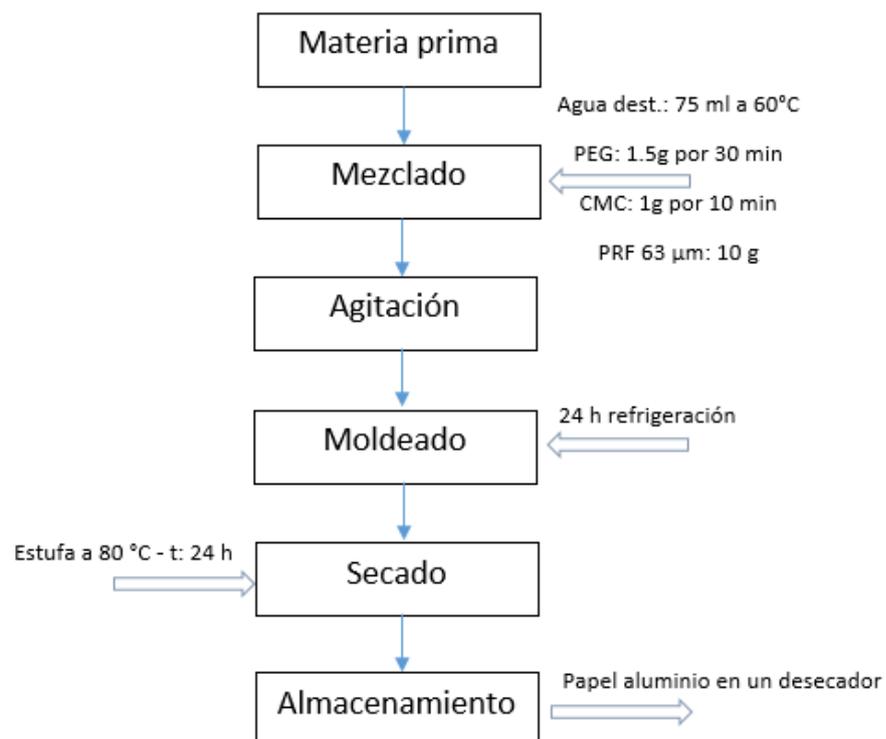


Fuente: Elaboración propia

2.2.2.2 *Desarrollo de precursores de Raquis de banana oxidado.* En un vaso de precipitación se colocaron 75 ml de agua destilada y se calentó a una temperatura de 60 °C en una estufa, luego se agrega de manera progresiva 1.5 g de polietilenglicol PEG mientras se agita con un equipo de agitación durante 30 min hasta homogenizar. Posteriormente se agregó de manera gradual 1g de carboximetilcelulosa CMC (permite que el polvo de raquis no flote en el medio líquido) y se agitó por 10 min hasta diluir por completo obteniéndose una solución densa y semitransparente. Finalmente se agrega en porciones sucesivas 10 g de polvo de raquis fino de 63 µm. Como aumenta su espesor, se agita manualmente con una varilla de agitación hasta obtener una masa homogénea y espesa (pasta). Luego se coloca la masa en moldes y se lleva a refrigeración durante 24 h. Después de ese tiempo, son llevadas a una estufa a 80 ° C durante otras 24 h, con el fin de lograr un choque térmico. El calor permite que la masa se compacte, debido a que se elimina la humedad, y se formen pequeños cubos. Para almacenarlos, se lo debe hacer en papel aluminio y en un lugar seco. Este material será oxidado con TEMPO para incrementar sus grupos funcionales, los cuales, permiten mejorar la capacidad de adsorción.<sup>42</sup>

En el diagrama 2, se da a conocer el proceso para la obtención de los precursores de Raquis de banana oxidado.

*Diagrama 2.* Precursores de Raquis de banana oxidado



Fuente: Elaboración propia

2.2.2.3 *Oxidación de Raquis de banano con TEMPO (RBT)*. En un vaso de precipitación de 400 ml se colocan 200 ml de agua destilada, se añaden 5g de RBT y se deja homogenizar por 15 min. Luego se agrega 0.1g de Tempo y 0.5g de NaBr, se deja agitar por 15 min y se mide el pH. Se coloca en una bureta NaOH y se va añadiendo gotas (inicia conteo de 6 horas desde la primera gota) a la solución y se va midiendo el pH hasta llegar a un pH 10. La medición debe estabilizarse en el medidor de pH, lo que indica que la oxidación ha llegado a su fin. Si se pasa el pH a más de 10.4, se debe agregar HNO<sub>3</sub> hasta que el medidor indique un pH de 10 (termina el conteo de 6 horas en total). Luego, se filtra en embudos con papel filtro, realizando 10 lavados con agua destilada. Posteriormente se deja reposar por 24 horas para lograr una filtración total y se lleva a la estufa por 2 días a 60 °C. Después se retira el material RBT oxidado y seco y, se coloca en un frasco ámbar en un lugar libre de humedad.<sup>41</sup>

Diagrama 3. Oxidación de RBT



Fuente: Elaboración propia

2.2.2.4 *Elaboración de una solución patrón de itrio Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>*. Para preparar 500 ml de una solución patrón de Itrio a 2000 ppm, se agregan 1.26 g de óxido de itrio (Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). En 200 ml de agua destilada a 100 °C y en constante agitación, se va agregando el óxido de itrio y alícuotas de ácido nítrico 1N hasta un aproximado de 3 ml. Se deja enfriar la solución y se lleva a un balón de 500 ml y se afora, obteniéndose la solución patrón.<sup>42</sup>

2.2.2.5 *Estudio de pH*. Estas pruebas permitieron determinar a qué pH se logra una óptima adsorción. Se realizaron con pH 4 y 5 por duplicado. Se preparó una solución de 50 ppm de itrio a partir de la solución patrón, la cual se ajustó su pH a 4 y 5 con soluciones de HNO<sub>3</sub> y NaOH. Se pesó 0.025g de RBT y se colocó en cada tubo falcón

de 50 ml y respectivamente se agregó 25 ml de solución de itrio 50 ppm de pH 4. Luego se colocaron en agitación mecánica por 24 horas temperatura ambiente y posteriormente se midió su pH, se tomó una alícuota de 10 ml de cada tubo, se filtró y se almacenó en tubos falcón. Estas muestras fueron llevadas para su análisis en un equipo de ICP, para poder determinar la concentración final de Itrio y compararla con la inicial. Los experimentos se desarrollaron por duplicado. El mismo proceso se repite para el estudio de pH = 5.<sup>42</sup>

En el diagrama 4, se puede observar el proceso que se lleva a cabo para realizar el estudio de pH.

*Diagrama 4. Estudio de pH*



Fuente: Elaboración propia

*2.2.2.6 Estudio de Isotermas.* Con el pH óptimo obtenido en el estudio de pH se llevó a cabo los análisis de isotermas. Para ello, se prepararon diferentes concentraciones de solución de Itrio, siendo estos: 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 500, 750 ppm (mg/L). Se pesó 0.025g de RBT en cada tubo falcon, a los cuales se agregaron 25 mL de cada solución de itrio a las diferentes concentraciones, se rotuló cada tubo y se llevó a agitación mecánica por 24 horas a temperatura ambiente. Luego se tomó una alícuota de 10 ml de cada tubo y se filtró. Se almacenó en un lugar cerrado y se llevaron las muestras para analizarlas en el equipo de ICP.

En el diagrama 5, se observa el proceso para llevar a cabo el estudio de isotermas.

*Diagrama 5. Estudio de isotermas*

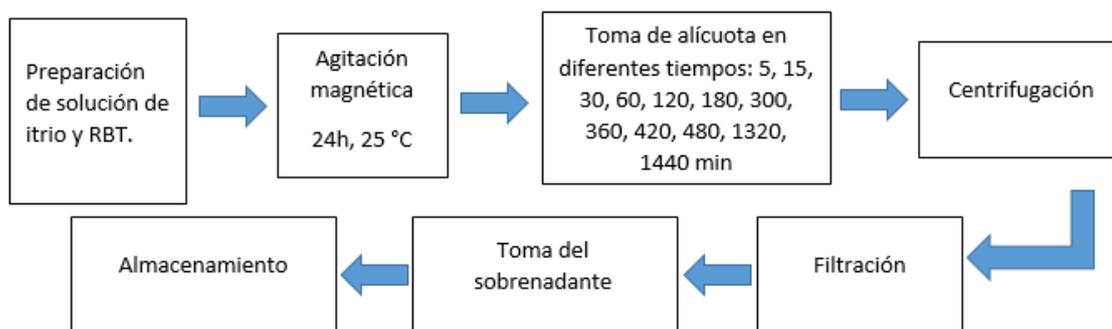


Fuente: Elaboración propia

2.2.2.7 *Estudio de cinética*. Este estudio se realizó por duplicado. En un vaso de precipitación se colocan 500 ml de una solución de itrio a 50 ppm y 0.5 g de RBT, el estudio consistió en tomar alícuotas en diferentes intervalos de tiempos, siendo de 5, 15, 30, 60, 120, 180, 300, 360, 420, 480, 1320, 1440 min. Cada alícuota se centrifugó para tomar el sobrenadante con mucho cuidado, se filtró y se almacenó en tubos falcon de 15 ml. El sólido precipitado se regresa nuevamente al vaso de precipitación donde se está haciendo el estudio de cinética. Esto debe hacerse en cada periodo de tiempo marcado. Luego las muestras se almacenan en refrigeración para ser analizadas en el ICP.<sup>42</sup>

En el diagrama 6, se observa el proceso para llevar a cabo el estudio de cinética.

Diagrama 6. Estudio de cinética



Fuente: Elaboración propia

## 2.3 Procesos de recolección y análisis de los datos

2.3.1 *Proceso de Recolección*. El raquis de banano usado para la elaboración de los precursores de raquis de banano oxidado, fue recolectado en las plantaciones de banano de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Técnica de Machala.

2.3.2 *Análisis de los datos*. Este trabajo de investigación se realizará a través de estudios experimentales, analíticos y comparativos.

La parte experimental se llevó a cabo en el Laboratorio de Investigaciones de la Facultad de Ciencias Químicas de la Salud de la Universidad Técnica de Machala, por otra parte, las mediciones de la concentración del analito de interés se efectuaron utilizando un equipo de ICP-OES en el laboratorio de suelos del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), localizado en Quevedo, provincia de los Ríos.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Estudio de pH

Este estudio da una idea de cuál es el rango de pH que trabaja mejor el proceso de adsorción, ya que los solutos dependen de su valor. Este estudio se realizó con dos valores de pH (4 y 5) con itrio  $Y^{+3}$  con el material RBT.

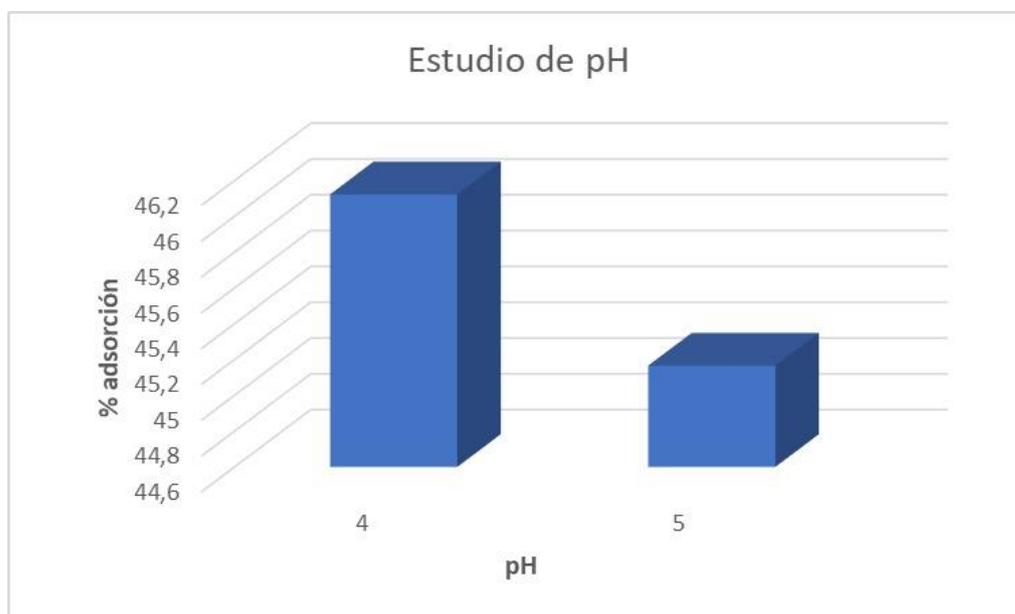
En la tabla 5, se observa que a pH 4 existe un porcentaje de adsorción del 46.123% con una capacidad de adsorción de  $24.836 \text{ mg.g}^{-1}$ , mayor que la del pH 5. En la gráfica 3, se muestra de manera resumida el pH óptimo a la cual se da la adsorción.

Tabla 5. Datos experimentales de adsorción del RBT

pH	% Adsorción	$Q_{\text{max}}$ ( $\text{mg.g}^{-1}$ )
4	46,123	24,836
5	45,166	24,321

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3. Porcentajes de adsorción por cada pH



Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos del estudio realizado, se alinean con los de otra investigación de pH de adsorción de níquel (II) sobre carbón activado, donde la eliminación máxima fue producida a un pH de 4.0. Asimismo, se registró un incremento en la adsorción de

Ni (II) en carbón activado obtenido de la médula de bagazo de caña de azúcar (SBP-AC) conforme transcurría el tiempo, estabilizándose al cabo de 4 horas.

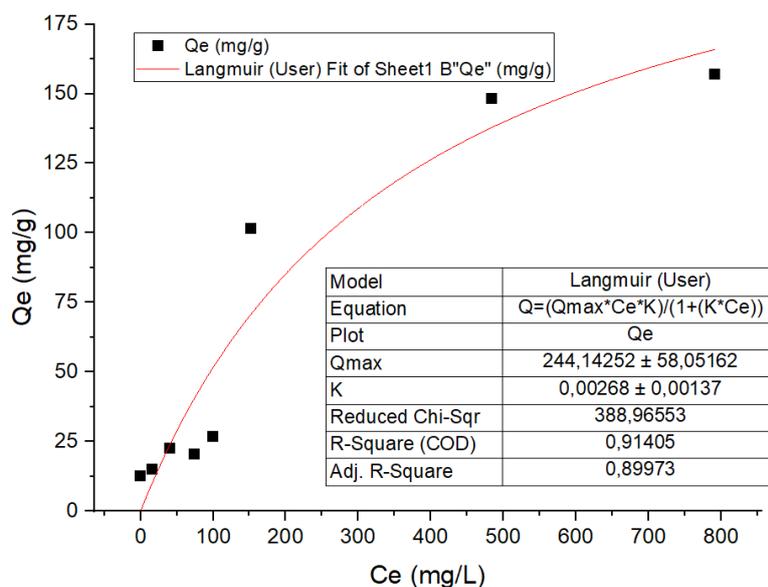
Finalmente, los estudios indicaron que el SBP-AC es efectivo en remover Ni(II) de líquidos acuosos. Dicha eficacia en la captura de Ni(II) por parte del SBP-AC se vio afectada por varios factores, incluyendo la concentración inicial de Ni(II), la duración del contacto, la rapidez de mezclado, la proporción de adsorbente usado y el pH del medio acuoso.<sup>43</sup>

### 3.2 Estudio de Isotermas

#### 3.2.1 Isoterma de Langmuir

En la gráfica 4, se muestran los datos experimentales aplicando el modelo matemático de Langmuir, donde se observa que la capacidad máxima de adsorción de RBT para la recuperación selectiva de itrio fue de 244.143 mg.g<sup>-1</sup>.

Gráfica 4. Isoterma de Langmuir

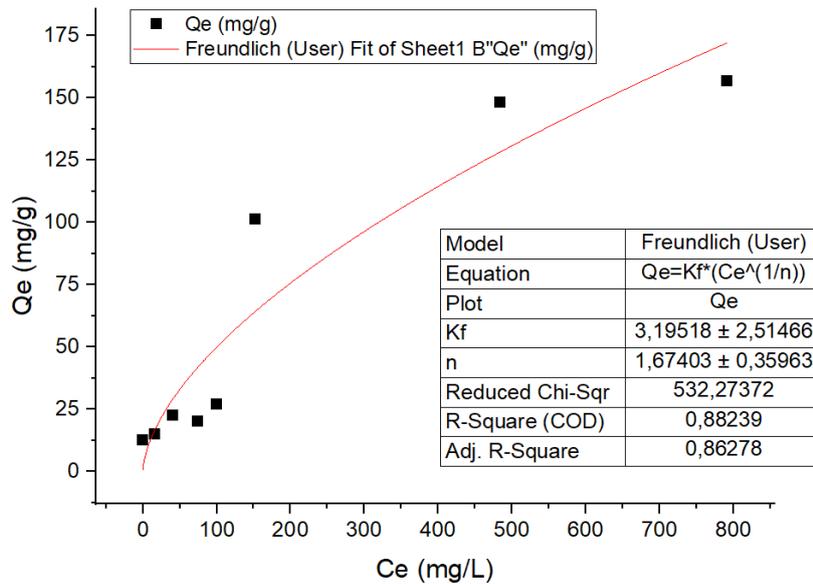


Fuente: Elaboración propia

#### 3.2.2 Isoterma de Freundlich

En la gráfica 5, los datos experimentales del material de RBT con el modelo matemático Freundlich muestra una capacidad de adsorción de 3.195.

Gráfica 5. Isoterma de Freundlich



Fuente: Elaboración propia

En la tabla 6, se muestran todos los resultados de los modelos matemáticos de Langmuir y Freundlich aplicados al material RBT usando el programa estadístico Origin 2024.

Tabla 6. Resultados del estudio de isotermas de cada modelo matemático.

Modelo Matemático	Fórmula	Parámetros	Valores	Unidades
Langmuir	$Q_e = \frac{Q_{max} * C_e * K}{1 + (K * C_e)}$	$Q_{max}$	244,143	$mg.g^{-1}$
		$K$	0,00268	-
		$R^2$	0,914	-
Freundlich	$Q_e = K_f (C_e^{1/n})$	$K_f$	3,195	$mg.g^{-1}$
		$n$	1,674	-
		$R^2$	0,882	-

Fuente: Elaboración propia

En la comparación de los 2 modelos estudiados en base a los datos experimentales, el proceso de adsorción con el modelo de Langmuir obtuvo un mejor ajuste en el coeficiente de correlación  $R^2 = 0.914$ .

En comparación con un estudio realizado se compara el uso eficaz de biocarbón activado por KOH derivado del bagazo de la caña de azúcar en la adsorción de norfloxacin con otros métodos. Se encontró que la isoterma de Langmuir se ajustaba mejor a los datos, con una capacidad máxima de adsorción de norfloxacin estimada en

157,4 mg·g<sup>-1</sup>. Esto sugiere que el biocarbón activado posee una alta capacidad de adsorción para la norfloxacin, lo que lo hace prometedor para aplicaciones de tratamiento de aguas residuales contaminadas con este antibiótico.<sup>44</sup>

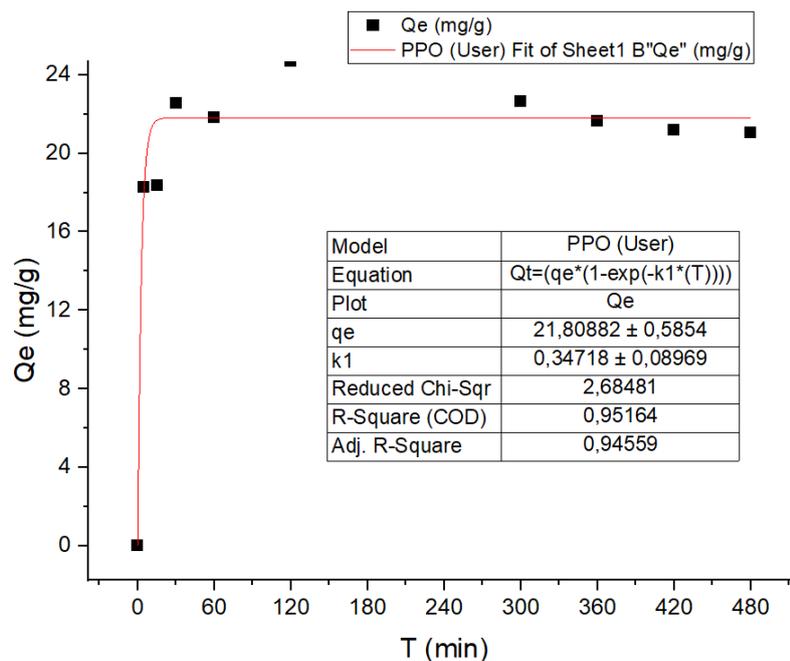
### 3.3 Estudio Cinético

En este estudio se muestra la cantidad de adsorbato o sus concentraciones que se adhieren al material RBT en determinada cantidad de tiempo. Para ello se emplearon los modelos matemáticos de Pseudo Primer Orden (PPO) y Pseudo Segundo Orden (PSO) y de esa manera identificar el modelo adecuado con los datos experimentales obtenidos.

#### 3.3.1 Modelo cinético de Pseudo primer orden PPO

En la gráfica 6, se observa la curva en el modelo cinético PPO:

Gráfica 6. Modelo cinético PPO



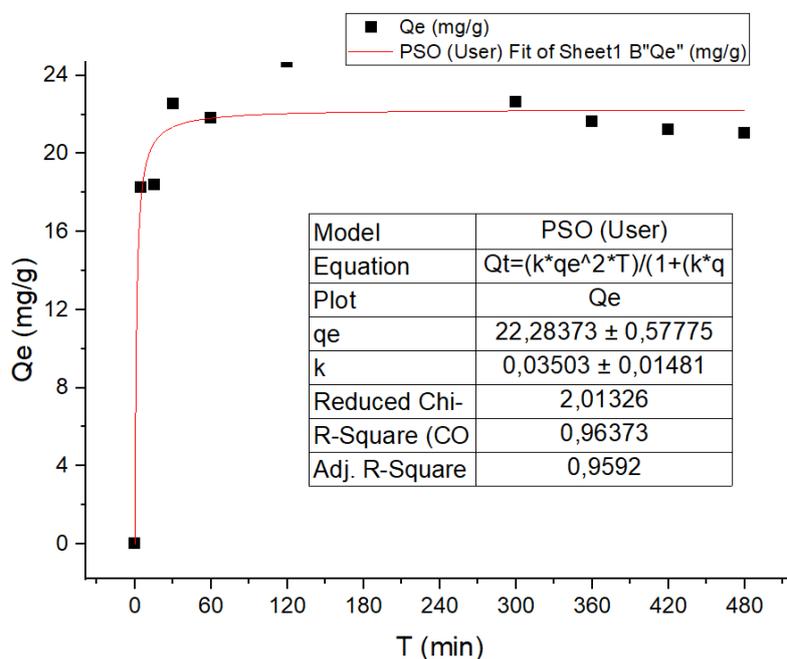
Fuente: Elaboración propia

Se observa una capacidad de adsorción de RBT de 21,809 mg·g<sup>-1</sup> para la recuperación selectiva de itrio con un R<sup>2</sup>= 0.95164.

#### 3.3.2 Modelo cinético de Pseudo segundo orden PSO

En la gráfica 7, se observa la curva en el modelo cinético PSO:

Gráfica 7. Modelo cinético PSO



Fuente: Elaboración propia

En la tabla 7, se observan los resultados de estudios de cinética de los Modelos cinéticos PPO y PSO.

Tabla 7. Resultados del estudio de cinética por cada modelo matemático.

Modelo Matemático	Fórmula	Parámetros	Valores	Unidades
PPO	$Q_t = (Q_e * (1 - \exp^{(-k_1) \cdot (t)}))$	$Q_e$	21,809	$\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$
		$K_1$	0,347	-
		$R^2$	0,952	-
PSO	$Q_t = \frac{(K_2 * Q_e^2 * t)}{(1 + (K_2 * Q_e * t))}$	$Q_e$	22,284	$\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$
		$K_2$	0,035	-
		$R^2$	0,964	-

Fuente: Elaboración propia

Se observa una capacidad de adsorción de RBT de  $22.284 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  para la recuperación selectiva de itrio para el modelo PSO.

En la comparación de los 2 modelos estudiados en base a los datos experimentales, el proceso de adsorción de Pseudo Segundo Orden (PSO) se obtuvo un mejor ajuste en

el  $R^2= 0.964$ . Al inicio del proceso es más rápida la adsorción, hasta que aproximadamente a los 60 min se ha alcanzado el equilibrio cinético.

Por lo que el modelo cinético PSO describe bien la cinética de adsorción del itrio en el RBT, esto se debe a que en este modelo matemático prevalece la mayor disponibilidad de lugares activos en el material para capturar más eficientemente el catión y una vez se saturan, la adsorción alcanza su estado de equilibrio.<sup>45</sup>

Al comparar con un estudio de Adsorción de neodimio, terbio y disprosio mediante un adsorbente magnético a base de polímeros sintéticos, el pseudo-segundo orden (PSO) se ajusta significativamente a los datos cinéticos de adsorción en este estudio debido a que el proceso de adsorción sigue una cinética de segundo orden, lo que implica una interacción entre dos especies adsorbidas o entre una especie adsorbida y una superficie. Esto sugiere que el mecanismo de adsorción está gobernado por una etapa de reacción química que limita la velocidad del proceso.<sup>46</sup>

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

- En este trabajo de investigación, se obtuvo el polvo de raquis de banano (RB) de la especie Cavendish, mediante procesos con tratamientos físicos y químicos.
- La oxidación del raquis de banano con TEMPO permitió incrementar las propiedades adsorbentes, introduciendo grupos funcionales a su estructura.
- La mayor adsorción se logró con un pH de 4, teniendo un porcentaje de adsorción de 46.12%. En el estudio de isotermas y en base a los datos experimentales obtenidos, su capacidad máxima de adsorción se dió utilizando el modelo de Langmuir, con un valor de  $244.143 \text{ mg.g}^{-1}$ , teniendo un coeficiente de correlación  $R^2= 0.914$ . El estudio de cinética permitió identificar que, entre los modelos de cinética de adsorción, el modelo adecuado es el modelo Pseudo Segundo Orden (PSO), ya que se obtuvo un  $R^2= 0.964$  y un  $Q_e= 22.284 \text{ mg.g}^{-1}$ , logrando el equilibrio en un tiempo aproximado de 60 min.
- En base a estos resultados, se concluye que el RBT, permite una mayor adsorción del elemento contaminante, ya que se han incrementado sus propiedades de adsorción teniendo mayor cantidad de poros en su superficie.

### 4.2 Recomendaciones

- Realizar análisis comparativos de costo-efectividad entre Raquis de banano (RBT) y otros adsorbentes convencionales o emergentes, para determinar su competitividad en aplicaciones a gran escala.
- Incrementar la investigación sobre el tratamiento superficial de RBT para ampliar su espectro de adsorción contra diversos contaminantes.
- Ampliar el volumen y diversidad de contaminantes tratados en estudios con RBT, incluyendo metales pesados, colorantes industriales y compuestos farmacéuticos, para evaluar su versatilidad.

## BIBLIOGRAFÍA

- (1) Balaram, V. Rare Earth Elements: A Review of Applications, Occurrence, Exploration, Analysis, Recycling, and Environmental Impact. *Geoscience Frontiers* **2019**, *10* (4), 1285–1303. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.12.005>.
- (2) Tickner, B. J.; Stasiuk, G. J.; Duckett, S. B.; Angelovski, G. The Use of Yttrium in Medical Imaging and Therapy: Historical Background and Future Perspectives. *Chem Soc Rev* **2020**, *49* (17), 6169–6185. <https://doi.org/10.1039/C9CS00840C>.
- (3) Vásquez-Castillo, W.; Racines-Oliva, M.; Moncayo, P.; Viera, W.; Seraquive, M. Calidad Del Fruto y Pérdidas Poscosecha de Banano Orgánico (*Musa Acuminata*) En El Ecuador. *Enfoque UTE* **2019**, *10* (4), 57–66. <https://doi.org/10.29019/enfoque.v10n4.545>.
- (4) Caicedo, W.; Viáfara, D.; Pérez, M.; Alves Ferreira, F. N.; Rubio, G.; Yanza, R.; Caicedo, M.; Caicedo, L.; Valle, S.; Motta Ferreira, W. Características Químicas Del Ensilado de Raquis de Plátano (*Musa Paradisiaca*) y Banano Orito (*Musa Acuminata* AA) Tratado Con Suero de Leche y Urea. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú* **2020**, *31* (4), e19035. <https://doi.org/10.15381/rivep.v31i4.19035>.
- (5) Anwar, Z.; Gulfranz, M.; Irshad, M. Agro-Industrial Lignocellulosic Biomass a Key to Unlock the Future Bio-Energy: A Brief Review. *J Radiat Res Appl Sci* **2014**, *7* (2), 163–173. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2014.02.003>.
- (6) Lapo, B.; Bou, J. J.; Hoyo, J.; Carrillo, M.; Peña, K.; Tzanov, T.; Sastre, A. M. A Potential Lignocellulosic Biomass Based on Banana Waste for Critical Rare Earths Recovery from Aqueous Solutions. *Environmental Pollution* **2020**, *264*, 114409. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114409>.
- (7) Al-Qodah, Z.; Yahya, M. A.; Al-Shannag, M. On the Performance of Bioadsorption Processes for Heavy Metal Ions Removal by Low-Cost Agricultural and Natural by-Products Bioadsorbent: A Review. *Desalination Water Treat* **2017**, *85*, 339–357. <https://doi.org/10.5004/dwt.2017.21256>.
- (8) Vera Cabezas, L. M.; Bermejo Campos, D.; Uguña Rosas, M. F.; Garcia Alvear, N.; Flores Zamora, M.; Brazales, D. MODELADO EN COLUMNA DE LECHO FIJO PARA LA BIOADSORCIÓN DE Cd<sup>2+</sup> Y Pb<sup>2+</sup> CON CÁSCARA DE CACAO. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* **2018**, *34* (4), 611–620. <https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.04.05>.

- (9) Stahlfeld, K. W.; Belmont, E. L. Carbon Foam Production from Lignocellulosic Biomass via High Pressure Pyrolysis. *J Anal Appl Pyrolysis* **2021**, *156*, 105115. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105115>.
- (10) Priyanka, M.; Saravanakumar, M. P. A Short Review on Preparation and Application of Carbon Foam. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng* **2017**, *263*, 032018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/263/3/032018>.
- (11) Ganguli, R.; Cook, D. R. Rare Earths: A Review of the Landscape. *MRS Energy & Sustainability* **2018**, *5* (1), 6. <https://doi.org/10.1557/mre.2018.7>.
- (12) Salinas-Reyes, T.; Ortega-Guerrero, M. A. Elementos de Tierras Raras En Agua Subterránea y Su Relación Con Los Sistemas Flujo En Rocas Marinas y Volcánicas Del Centro de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* **2019**, *36* (1), 125–145. <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2019.1.714>.
- (13) Binnemans, K.; Jones, P. T.; Müller, T.; Yurramendi, L. Rare Earths and the Balance Problem: How to Deal with Changing Markets? *Journal of Sustainable Metallurgy* **2018**, *4* (1), 126–146. <https://doi.org/10.1007/s40831-018-0162-8>.
- (14) Álvarez Calderón, C. E.; Trujillo Palacio, J. H. Geopolítica de Las Tierras Raras: Un Recurso Natural Estratégico Para La Seguridad Multidimensional Del Estado. *Revista Científica General José María Córdova* **2020**, *18* (30), 335–355. <https://doi.org/10.21830/19006586.587>.
- (15) Zhang, F.; Wang, Z.; Wang, S.; Fang, H.; Chen, M.; Xu, D.; Tang, L.; Wang, D. Physicochemical Properties and Ecotoxicological Effects of Yttrium Oxide Nanoparticles in Aquatic Media: Role of Low Molecular Weight Natural Organic Acids. *Environmental Pollution* **2016**, *212*, 113–120. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.01.054>.
- (16) Cerro, S.; Llusar, M.; Gargori, C.; Monrós, G. Cool and Photocatalytic Yellow Ceramic Pigments; from Lead-Tin to Cr Doped Scheelite Pigments. *Ceram Int* **2019**, *45* (4), 4613–4625. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.11.150>.
- (17) Bilal, M.; Wang, Z.; Cui, J.; Ferreira, L. F. R.; Bharagava, R. N.; Iqbal, H. M. N. Environmental Impact of Lignocellulosic Wastes and Their Effective Exploitation as Smart Carriers – A Drive towards Greener and Eco-Friendlier Biocatalytic Systems. *Science of The Total Environment* **2020**, *722*, 137903. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137903>.
- (18) Zimmermann, T.; Bordeanu, N.; Strub, E. Properties of Nanofibrillated Cellulose from Different Raw Materials and Its Reinforcement Potential. *Carbohydr Polym* **2010**, *79* (4), 1086–1093. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.10.045>.

- (19) Tiappi Deumaga, M. F.; Jacquet, N.; Vanderghem, C.; Aguedo, M.; Thomas, H. G.; Gerin, P.; Deleu, M.; Richel, A. Fractionation and Structural Characterization of Hemicellulose from Steam-Exploded Banana Rachis. *Waste Biomass Valorization* **2020**, *11* (5), 2183–2192. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0457-9>.
- (20) Braulio, I. J.; Pinos, A. *UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA AMBIENTAL “COMPARACIÓN DEL RENDIMIENTO Y CALIDAD DE BIOETANOL OBTENIDO A PARTIR DE LA BIOMASA LIGNOCELULOSICA DE LOS PSEUDOTALLOS DE BANANO” AUTORA: ANDREA MARIBEL LLANGARI SIBRI TUTOR.*
- (21) Mora, J. C.; Esquivel, M.; Durán, M.; Zamora, R. *OBTENCIÓN Y EVALUACIÓN DE MEZCLAS DE POLIPROPILENO CON FIBRAS DE RAQUIS DE BANANO (Musa AAA);* 2015; Vol. 16.
- (22) Aurelio, J.; Villalta, P. (Enero-Abril) Estudio Técnico-Económico Para La Instalación de Una Planta Procesadora de Papel Prensa Utilizando Raquis de Banano. **2011**, *110* (1). <https://doi.org/10.53591/rug.v110i1.441>.
- (23) Coelho-da-Costa, A. P.; Zuniga-Linan, L.; Mendonça-Cidreira, A. C.; Hatami, T.; Cabral-Júnior, A. A.; Cutrim-Gomes, R.; Cardoso-Rocha, J. J. Oxidação Com Persulfato de Amônio Da Biomassa Lignocelulósica e Da Biomassa de Açaí Para a Extração Da Nanocristais de Celulose: Estado Da Arte. *Revista ION* **2022**, *35* (1). <https://doi.org/10.18273/revion.v35n1-2022005>.
- (24) Beejapur, H. A.; Zhang, Q.; Hu, K.; Zhu, L.; Wang, J.; Ye, Z. TEMPO in Chemical Transformations: From Homogeneous to Heterogeneous. *ACS Catal* **2019**, *9* (4), 2777–2830. <https://doi.org/10.1021/acscatal.8b05001>.
- (25) Levanič, J.; Šenk, V. P.; Nadrah, P.; Poljanšek, I.; Oven, P.; Haapala, A. Analyzing TEMPO-Oxidized Cellulose Fiber Morphology: New Insights into Optimization of the Oxidation Process and Nanocellulose Dispersion Quality. *ACS Sustain Chem Eng* **2020**, *8* (48), 17752–17762. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c05989>.
- (26) Wang, J.; Guo, X. Adsorption Isotherm Models: Classification, Physical Meaning, Application and Solving Method. *Chemosphere* **2020**, *258*, 127279. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127279>.
- (27) Menkouchi Sahli, M. A.; Annouar, S.; Mountadar, M.; Soufiane, A.; Elmidaoui, A. Nitrate Removal of Brackish Underground Water by Chemical Adsorption and by

- Electrodialysis. *Desalination* **2008**, 227 (1–3), 327–333. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.07.021>.
- (28) Lavrenko, V. A.; Podchernyaeva, I. A.; Shchur, D. V.; Zolotarenko, An. D.; Zolotarenko, Al. D. Features of Physical and Chemical Adsorption During Interaction of Polycrystalline and Nanocrystalline Materials with Gases. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics* **2018**, 56 (9–10), 504–511. <https://doi.org/10.1007/s11106-018-9922-z>.
- (29) Thommes, M.; Cychosz, K. A. Physical Adsorption Characterization of Nanoporous Materials: Progress and Challenges. *Adsorption* **2014**, 20 (2–3), 233–250. <https://doi.org/10.1007/s10450-014-9606-z>.
- (30) salah omer, A.; A.El Naeem, G.; Abd-Elhamid, A. I.; O.M. Farahat, O.; A. El-Bardan, A.; M.A. Soliman, H.; Nayl, A. A. Adsorption of Crystal Violet and Methylene Blue Dyes Using a Cellulose-Based Adsorbent from Sugercane Bagasse: Characterization, Kinetic and Isotherm Studies. *Journal of Materials Research and Technology* **2022**, 19, 3241–3254. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.06.045>.
- (31) Boeris, P. S.; Agustín, M. del R.; Acevedo, D. F.; Lucchesi, G. I. Biosorption of Aluminum through the Use of Non-Viable Biomass of *Pseudomonas Putida*. *J Biotechnol* **2016**, 236, 57–63. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2016.07.026>.
- (32) Ighalo, J. O.; Omoarukhe, F. O.; Ojukwu, V. E.; Iwuozor, K. O.; Igwegbe, C. A. Cost of Adsorbent Preparation and Usage in Wastewater Treatment: A Review. *Cleaner Chemical Engineering* **2022**, 3, 100042. <https://doi.org/10.1016/j.clce.2022.100042>.
- (33) Valladares-Cisneros, M. G.; Valerio Cárdenas, C.; de la Cruz Burelo, P.; Melgoza Alemán, R. M. Adsorbentes No-Convencionales, Alternativas Sustentables Para El Tratamiento de Aguas Residuales. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín* **2017**, 16 (31), 55–73. <https://doi.org/10.22395/rium.v16n31a3>.
- (34) Guiza, S. Biosorption of Heavy Metal from Aqueous Solution Using Cellulosic Waste Orange Peel. *Ecol Eng* **2017**, 99, 134–140. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.11.043>.
- (35) Científica, Y.; Tecnológica, A. C.; Verónica, A.; Rodríguez, V.; José, R.; Rangel, M.; San, L.; Potosí, S. L. P.; De, J. *INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN Tesis Que Presenta*.
- (36) Ramón de los Santos, C.; Barajas Fernández, J.; Pérez Hernández, G.; Hernández Rivera, M. Á.; Díaz Flores, L. L. Adsorción de Cobre (II) y Cadmio (II) En Suspensiones Acuáticas de CaCO<sub>3</sub> Biogénico Nanoestructurado. *Boletín de la*

- Sociedad Española de Cerámica y Vidrio* **2019**, *58* (1), 2–13.  
<https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2018.05.003>.
- (37) Senthil Kumar, P.; Ramalingam, S.; Senthamarai, C.; Niranjanaa, M.; Vijayalakshmi, P.; Sivanesan, S. Adsorption of Dye from Aqueous Solution by Cashew Nut Shell: Studies on Equilibrium Isotherm, Kinetics and Thermodynamics of Interactions. *Desalination* **2010**, *261* (1–2), 52–60.  
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.05.032>.
- (38) Albis Arrieta, A.; Llanos Reales, H.; Galeano Gil, J.; García Moreno, D. Adsorción de Azul de Metileno Utilizando Cáscara de Yuca (Manihot Esculenta) Modificada Químicamente Con Ácido Oxálico. *Revista ION* **2019**, *31* (2), 99–110.  
<https://doi.org/10.18273/revion.v31n2-2018007>.
- (39) Vigdorowitsch, M.; Pchelintsev, A.; Tsygankova, L.; Tanygina, E. Freundlich Isotherm: An Adsorption Model Complete Framework. *Applied Sciences* **2021**, *11* (17), 8078. <https://doi.org/10.3390/app11178078>.
- (40) William Kajjumba, G.; Emik, S.; Öngen, A.; Kurtulus Özcan, H.; Aydın, S. Modelling of Adsorption Kinetic Processes—Errors, Theory and Application. In *Advanced Sorption Process Applications*; IntechOpen, 2019.  
<https://doi.org/10.5772/intechopen.80495>.
- (41) SALAZAR AGUILAR LEONEL FRANCISCO; CELY ROMAN ERIKA DANIELA. NANOFIBRAS DE CELULOSA OXIDADAS CON TEMPO A PARTIR DEL RAQUIS DE BANANO PARA LA RECUPERACIÓN SELECTIVA DE ITRIO, Universidad Técnica de Machala, Machala, 2023.
- (42) PAOLA PRISCILA CAJAMARCA GONZALEZ; ROMERO AGUILAR KAREN YANETH INGENIERA QUÍMICA. ESPUMAS DE CARBÓN A PARTIR DE RAQUIS DE BANANO PARA LA RECUPERACIÓN DE ITRIO EN SOLUCIONES ACUOSAS, Universidad Técnica de Machala, Machala, 2022.
- (43) Anoop Krishnan, K.; Sreejalekshmi, K. G.; Baiju, R. S. Nickel(II) Adsorption onto Biomass Based Activated Carbon Obtained from Sugarcane Bagasse Pith. *Bioresour Technol* **2011**, *102* (22), 10239–10247.  
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.08.069>.
- (44) Zhou, Y.; Lan, Y.; Short, M. D.; Shi, J.; Zhang, Q.; Xu, J.; Qian, G. Effective Use of Sugarcane-Bagasse-Derived KOH-Activated Biochar for Remediating Norfloxacin-Contaminated Water. *Toxics* **2023**, *11* (11).  
<https://doi.org/10.3390/toxics11110908>.

- (45) Tang, W.; Cai, N.; Xie, H.; Liu, Y.; Wang, Z.; Liao, Y.; Wei, T.; Zhang, C.; Fu, Z.; Yin, D. Efficient Adsorption Removal of Cd <sup>2+</sup> from Aqueous Solutions by HNO<sub>3</sub> Modified Bamboo-Derived Biochar. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng* **2020**, *729* (1), 012081. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/729/1/012081>.
- (46) Javadian, H.; Taghavi, M.; Ruiz, M.; Tyagi, I.; Farsadrooh, M.; Sastre, A. M. Adsorption of Neodymium, Terbium and Dysprosium Using a Synthetic Polymer-Based Magnetic Adsorbent. *Journal of Rare Earths* **2023**, *41* (11), 1796–1804. <https://doi.org/10.1016/j.jre.2022.08.021>.

## ANEXOS

### ANEXO A. Tratamiento preliminar de la muestra

#### Troceado y lavado del raquis de banano



#### *Secado y posterior Molienda del Raquis de banano*



#### Tamizado y obtención de polvo de raquis



## ANEXO B. Precursores de Raquis de Banano oxidado (RBT)

### Mezcla y agitación de los materiales



### Moldeado de la masa obtenida



### Obtención y Almacenamiento del Raquis de banano oxidado



## ANEXO C. Estudio de Adsorción

Dilución 10 de las muestras de pH 4 y 5 para mediciones en el ICP



Diluciones de las muestras de isoterma para mediciones en el ICP



Equipo de ICP-OES en el laboratorio de suelos del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP)

