



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE DURANGO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



“Estudio de la electrorremediación de suelos contaminados por Fe y Cu
aplicando diferentes carbones”

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestra en sistemas ambientales

Presenta:

Yessica Jezabel García Palacios

Director de tesis:

Dr. Víctor Jesús Martínez Gómez

Co-directora:

Dra. Anabel de la Cruz Delgado

Durango, Dgo. México

Junio 2025



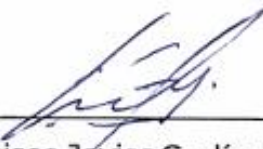
"Estudio de la electroremediación de suelos contaminados por Fe y Cu aplicando diferentes
carbones"

Presenta:

Yessica Jezabel García Palacios

Dr. Víctor Jesús Martínez Gómez Director	 Firma
Dra. Anabel de la Cruz Delgado Codirectora	 Firma
Dr. Jaime Cristóbal Rojas Montes Asesor	 Firma
Dr. Felipe Samuel Hernández Rodarte Asesor	 Firma


M.C. Tanja Montoya García
**Coordinadora del programa del posgrado
correspondiente**


Dr. Francisco Javier Godínez García
**Jefe de la División de Estudios de
Posgrado e Investigación**

Durango, Dgo. México

Junio 2025



Victoria de Durango, Dgo., a **30 / Mayo / 2025.**

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
DEPI / C / 288 / 2025.

ASUNTO: Autorización de Impresión de Tesis de Maestría.

C. YESSICA JEZABEL GARCÍA PALACIOS
No. DE CONTROL G22040313
P R E S E N T E .

De acuerdo al reglamento en vigor y tomando en cuenta el dictamen emitido por el jurado que le fue asignado para la revisión de su trabajo de tesis para obtener el **Grado de Maestro en Sistemas Ambientales**, esta División de Estudios de Posgrado e Investigación le autoriza la impresión del mismo, cuyo título es:

“Estudio de la electrorremediación de suelos contaminados por Fe y Cu aplicando diferentes carbones”

Sin otro particular de momento, quedo de Usted.

A T E N T A M E N T E .

Excelencia en Educación Tecnológica®
“La Técnica al Servicio de la Patria”

C. FRANCISCO JAVIER GODÍNEZ GARCÍA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN



FJGG'ammc.



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Blvd. Felipe Pescador No. 1830 Ote.,
Durango, Dgo., C.P. 34080 Tels. 618-818-69-36
e-mail: depposgrado@itdurango.edu.mx
tecnm.mx | itdurango.edu.mx





Victoria de Durango, Dgo., a 30 / Mayo / 2025.

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
DEPI / C / 287 / 2025.

ASUNTO: Autorización de Tema de Tesis de Maestría.

C. YESSICA JEZABEL GARCÍA PALACIOS
No. DE CONTROL G22040313
P R E S E N T E .

Con base en el Reglamento en vigor y teniendo en cuenta el dictamen emitido por el Jurado que le fue asignado, se le autoriza a desarrollar el tema de tesis para obtener el **Grado de Maestra en Sistemas Ambientales** cuyo título es:

"Estudio de la biorremediación de suelos contaminados por Fe y Cu aplicando diferentes carbones"

CONTENIDO:

	RESUMEN
	ABSTRACT
CAPÍTULO I.	INTRODUCCIÓN
CAPÍTULO II.	MARCO TEÓRICO
CAPÍTULO III.	MATERIALES Y MÉTODOS
CAPÍTULO IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN
CAPÍTULO V.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
	BIBLIOGRAFÍA

Sin otro asunto en particular, quedo de Usted.

ATENTAMENTE.

Excelencia en Educación Tecnológica®
"La Técnica al Servicio de la Patria"

C. FRANCISCO JAVIER GODÍNEZ GARCÍA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN



FJGG'ammc.



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Bvld. Felipe Pescador No. 1830 Ote.,
Durango, Dgo., C.P. 34080 Tels. 618-818-69-36
e-mail: depposgrado@itdurango.edu.mx
tecnm.mx | itdurango.edu.mx





Victoria de Durango, Dgo. a 19 de mayo de 2025

Por este conducto se hace constar que la tesis denominada "Estudio de la electrorremediación de suelos contaminados por Fe y Cu aplicando diferentes carbones", de la alumna Yessica Jezabel García Palacios, con número de control 22040313 estudiante del programa de Maestría en Sistemas Ambientales, revisada por primera vez, se sometió al software Turnitin Similarity para ser examinado, en donde el reporte del software mencionado mostró un porcentaje de 8% de similitud general.

Con base en el reporte de Turnitin, al criterio ético y profesional del director de tesis y al área del programa, se considera que cumple con los criterios de originalidad.

Con base en lo anterior se emite el siguiente dictamen.

Sé autoriza dar inicio a los trámites de obtención de grado.

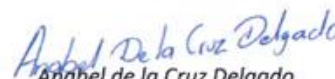
Nota: Después de la segunda revisión si el documento no cumple con los criterios de originalidad el dictamen será

No se autoriza dar inicio a los trámites de obtención de grado, documento plagado

Atentamente,


Víctor Jesús Martínez Gómez
Director de la Tesis
Vp.Bo.


Jaime Cristóbal Rojas Montes
Asesor


Anabel de la Cruz Delgado
Codirectora


Felipe Samuel Hernández Rodarte
Asesor

Cp
Alumno
Coordinación del programa



turnitin

Jezabel García
Tesis Jezabel García corr4 VJMG (1).docx

Similitud 8% Marcas de alerta

"Estudio de la electrorremediación de suelos contaminados por Fe y Cu aplicando diferentes carbones"

25

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestra en sistemas ambientales

Presenta:

Yessica Jezabel García Palacios

Director de tesis:

Dr. Víctor Jesús Martínez Gómez

Co-directora:

Dra. Anabel de la Cruz Delgado

Página 1 de 67 11564 palabras 228%

8% Similitud

Filtros

General

Fuentes

Mostrar las fuentes solapadas

1 Internet

www.scielo.org.mx

<1%

8 bloques de texto

79 palabras que coinciden

2 Internet

www.researchgate.net

<1%

1 bloques de texto

40 palabras que coinciden

3 Internet

cideteq.repositorioinstitucional...

<1%

4 bloques de texto

51 palabras que coinciden

4 Internet

www.coursehero.com

<1%

1 bloques de texto

49 palabras que coinciden

5 Trabajos enviados

BENEMERITA UNIVERSIDAD AUT...

<1%



LICENCIA DE USO OTORGADA POR YESSICA JEZABEL GARCIA PALACIOS de nacionalidad mexicana, mayor de edad, con domicilio ubicado en Calle Las Chiapanecas #117, Fracc. Valle del Mezquital II, Durango, Dgo., en mi calidad de titular de los derechos patrimoniales y morales y autor de la tesis denominada **“Estudio de la biorremediación de suelos contaminados por Fe y Cu aplicando diferentes carbones”** en adelante **“LA OBRA”** quien para todos los fines del presente documento se denominará **“EL AUTOR Y/O EL TITULAR”**, a favor del Instituto Tecnológico de Durango del Tecnológico Nacional de México, y con fundamento en lo dispuesto en los artículos 5, 18, 24, 25, 27, 30, 32 y 148 de la Ley Federal de Derechos de Autor, se establecen las cláusulas siguientes:

PRIMERA –OBJETO: “EL AUTOR Y/O TITULAR”, mediante el presente documento otorga al Instituto Tecnológico de Durango del Tecnológico Nacional de México, licencia de uso gratuita e indefinida respecto de **“LA OBRA”**, para almacenar, preservar, publicar, reproducir y/o divulgar la misma, con fines académicos, por cualquier medio en forma física y a través del repositorio institucional y del repositorio nacional, éste último consultable en la página: (<https://www.repositorionacionalcti.mx/>).

SEGUNDA - TERRITORIO: La presente licencia se otorga, de manera no exclusiva, sin limitación geográfica o territorial alguna, de manera gratuita e indefinida.

TERCERA -ALCANCE: La presente licencia contempla la autorización para formato uso de **“LA OBRA”** en cualquier formato o soporte material y se extiende a la utilización, de manera enunciativa más no limitativa a los siguientes medios: óptico, magnético, electrónico, virtual (red), mensaje de datos o similar conocido por conocerse.

CUARTA – EXCLUSIVIDAD: La presente licencia de uso aquí establecida no implica exclusividad en favor del Instituto Tecnológico de Durango; por lo tanto, **“EL AUTOR Y/O TITULAR”** conserva los derechos patrimoniales y morales de **“LA OBRA”**, objeto del presente documento.

QUINTA – CRÉDITOS: El Instituto Tecnológico de Durango y/o el Tecnológico Nacional de México reconoce que el **“AUTOR Y/O TITULAR”** es el único, primigenio y perpetuo titular de los derechos morales sobre **“LA OBRA”**; por lo tanto, siempre deberá otorgarle los créditos correspondientes por la autoría de la misma.

SEXTA – AUTORÍA: “EL AUTOR Y/O TITULAR” manifiesta ser el único titular de los derechos de autor que derivan de **“LA OBRA”** y declara que el material objeto del presente fue realizado por él, sin violentar o usurpar derechos de propiedad intelectual de terceros; por lo tanto, en caso de controversia sobre los mismos, se obliga a ser el único responsable.

Dado en la Ciudad de Durango, Dgo., a los diecisiete días del mes de junio del 2025.

“EL AUTOR Y/O TITULAR”

YESSICA JEZABEL GARCIA PALACIOS



Resumen

La industria minera desarrolla distintos procesos en la extracción de sus minerales, los cuales conllevan a una generación de residuos, conservando ciertas cantidades de minerales en ellos. Dichos residuos generan una contaminación en su entorno, afectando al medio ambiente. La contaminación del suelo por jales mineros se debe a la generación de relaves mineros que por consecuencia de un manejo no adecuado estos comienzan a desprender los minerales por medio de lixiviación. Además de estar expuestos a la intemperie y variaciones climáticas, contaminando en estos casos al suelo, modificando sus características físicas, químicas y biológicas.

Aunque en la actualidad existen diferentes técnicas para remediar los suelos (químico-físicas o biológicas), surge la idea de realizar una técnica de electrorremediación modificada haciendo el uso de distintos carbones para la remoción de metales pesados presentes en jales mineros.

Esta técnica consiste en generar un campo eléctrico en el suelo contaminado por metales pesados con la finalidad de ser removidos proponiendo el uso del carbón activado, carbón mineral activado (CMA) y carbón mesoporos ordenado (3 DOM) para aumentar la remoción. La experimentación consistió en realizar una caracterización a los jales mineros: cualitativamente mediante difracción de rayos X y cuantitativamente mediante espectrofotometría de absorción atómica, encontrando contaminación por cobre y hierro. Se caracterizó el material carbonoso en términos de área superficial (en un equipo de fisisorción), morfología (MEB) y difracción de rayos X.

La parte experimental se desarrolló en una celda electroquímica, utilizando dos electrodos carbón grafito (ánodo) y acero inoxidable (cátodo), la energía se suministró mediante una fuente de poder (75, 125 y 150 A/m²). Humectando el suelo con HCl, NaCl y EDTA, estos con distintas concentraciones (0.1, 0.5 y 1 M). donde se obtuvo una remoción para Cu de 92% humectando con EDTA a 0.5 M y una densidad de





corriente de 150 A/m^2 , y para el Fe de 97% con distinta densidad de corriente (125 A/m^2).

Posteriormente se experimentó añadiendo el carbón activado, realizando diferentes variaciones en los gramos de carbón activando (5 g, 1 g y 0.1 g), esto con la finalidad de obtener definidas las variables de experimentación con carbón. Como resultado las remociones oscilaban entre un 87% y 94%, usando EDTA a 0.5 M y 150 A/m^2 .

Finalmente, para aprovechar al máximo los carbones se optó por bajar la concentración de molaridad a 0.1 M y la densidad de corriente a 75 A/m^2 , aplicando 0.5 g de carbón. En donde la remoción más alta fue con carbón mineral activado comercial, de Cu 98.66% y 97.96% para Fe.

De esta manera y con base a los resultados obtenidos se observó que la presencia del carbón mineral activado comercial logró ser eficiente para la remoción usando las condiciones más bajas de la experimentación (0.1 M y 75 A/m^2), a comparación de las molaridades (0.5 M y 1 M) y densidades de corriente restantes (125 A/m^2 y 150 A/m^2).



Abstract

The mining industry undertakes various processes to extract minerals, many of which generate waste that still retains specific amounts of those minerals. These residues contribute to environmental pollution, particularly affecting the surrounding ecosystems. Soil contamination caused by mine tailings is primarily due to the improper handling of these residues, which can lead to the leaching of minerals into the soil. Additionally, exposure to outdoor conditions and climate variations further intensifies this contamination, altering the physical, chemical, and biological characteristics of the soil.

Although several remediation techniques currently exist (chemical-physical or biological), this study explores a modified electroremediation technique using different types of carbon materials for the removal of heavy metals present in mine tailings.

This approach involves applying an electric field to soil contaminated with heavy metals to extract them, using activated carbon, commercial activated mineral carbon (CMA), and ordered mesoporous carbon (3DOM) to enhance removal efficiency. The experimentation began with characterizing the mine tailings, both qualitatively using X-ray diffraction and quantitatively through atomic absorption spectrophotometry, to identify contamination by copper and iron. The carbon-based materials were also characterized in terms of surface area (using a physisorption analyzer), morphology (via scanning electron microscopy, or SEM), and X-ray diffraction.

The experimental phase was conducted in an electrochemical cell using two electrodes—graphite carbon (anode) and stainless steel (cathode). Power was supplied via a power source (at current densities of 75, 125, and 150 A/m²). The soil was moistened with HCl, NaCl, and EDTA in varying concentrations (0.1, 0.5, and 1 M). The highest removal rates achieved were 92% for copper using EDTA at 0.5 M and 150 A/m², and 97% for iron at 125 A/m².





Further tests included adding activated carbon in varying amounts (5 g, 1 g, and 0.1 g) to define the most effective experimental variables. The resulting removal rates ranged from 87% to 94% using EDTA at 0.5 M and a current density of 150 A/m².

Finally, to maximize carbon efficiency, the concentration was reduced to 0.1 M and the current density to 75 A/m², with 0.5 g of carbon applied. Under these conditions, the highest removal rates were achieved using commercial activated mineral carbon, with removal rates of 98.66% for copper and 97.96% for iron.

Based on these findings, commercial activated mineral carbon proved to be highly efficient for heavy metal removal, even under the lowest experimental conditions (0.1 M and 75 A/m²), outperforming higher concentrations (0.5 M and 1 M) and current densities (125 A/m² and 150 A/m²).