

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE CIENCIA E INGENIERÍA DE MATERIALES

“Evaluación de los extractos naturales de *Justicia Tinctoria* “Azul de Mata” y *Ganoderma Lucidum* “Hongo Ganoderma” como inhibidores de corrosión verdes en acero de bajo carbono en disoluciones de ácido clorhídrico (HCl 1M) y cloruro de sodio (NaCl 0.6M)”

Proyecto de graduación para optar por el título de
Ingeniera en Materiales con grado académico de Licenciatura

Realizado por: Mariana Leiva Coto

Profesora Guía: PhD. Jeimmy Cristina González Masís

Profesor Lector: MGP. Ronald Alberto Brenes Brenes

Profesor Lector: M.Sc. Fabián Araya Mora

Profesor Asesor: PhD. Juan José de Damborenea

Marzo, 2025

TEC | Tecnológico
de Costa Rica



Resumen

Leiva, Mariana. marzo, 2025. “Evaluación de los extractos naturales de *Justicia Tinctoria* “Azul de Mata” y *Ganoderma Lucidum* “Hongo Ganoderma” como inhibidores de corrosión verdes en acero de bajo carbono en disoluciones de ácido clorhídrico (HCl 1M) y cloruro de sodio (NaCl 0.6M)”, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas, Madrid, España. Profesor Asesor: PhD. Juan José de Damborenea.

El presente estudio analiza el efecto inhibitor de la corrosión del extracto natural de *Ganoderma Lucidum* en acero de bajo carbono expuesto a medios ácido (HCl 1M) y neutro (NaCl 0.6M). Se emplearon técnicas electroquímicas como espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) y curvas de polarización potenciodinámicas para evaluar la eficiencia de inhibición. Los resultados muestran que *Ganoderma Lucidum* presenta propiedades anticorrosivas dependientes del medio y la concentración del inhibidor. Se evidenció la adsorción de los compuestos bioactivos sobre la superficie del acero, formando una barrera protectora que reduce la velocidad de corrosión. Debido a problemas de solubilidad, *Justicia Tinctoria* no pudo ser evaluado. Este estudio destaca la viabilidad de los inhibidores de origen natural como alternativa ecológica a los inhibidores sintéticos tradicionales.

Abstract

Leiva, Mariana. March, 2025. "Evaluation of natural extracts of *Justicia Tinctoria* "Azul de Mata" and *Ganoderma Lucidum* "Hongo Ganoderma" as green corrosion inhibitors in low-carbon steel in hydrochloric acid (HCl 1M) and sodio chloride (NaCl 0.6M) solution", Instituto Tecnológico de Costa Rica, Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas, Madrid, Spain. Advisor: PhD. Juan José de Damborenea.

This study analyzes the corrosion inhibition effect of natural extracts of *Justicia Tinctoria* and *Ganoderma Lucidum* on low-carbon steel exposed to acidic (HCl 1M) and neutral (NaCl 0.6M) environments. Electrochemical techniques such as electrochemical impedance spectroscopy (EIS) and potentiodynamic polarization curves were used to evaluate inhibition efficiency. The results show that *Ganoderma Lucidum* exhibited anticorrosive properties in an acidic solution, forming a protective barrier on the steel surface and reducing the corrosion rate. In a neutral medium, no significant inhibitory effect was observed. Due to solubility issues, *Justicia Tinctoria* could not be evaluated. This study highlights the feasibility of natural-based inhibitors as an eco-friendly alternative to traditional synthetic inhibitors.

1.1.1. ACTA DE ENTREGA DEL INFORME FINAL DE LA PRÁCTICA DIRIGIDA

Se certifica que se ha recibido el Informe Final de la Práctica Dirigida, realizada por la estudiante Mariana Leiva Coto, carné 2019007715, la cual se titula: “Evaluación de los extractos naturales de *Justicia Tinctoria* “Azul de Mata” y *Ganoderma Lucidum* “Hongo Ganoderma” como inhibidores de corrosión verdes en acero de bajo carbono en disoluciones de ácido clorhídrico (HCl 1M) y cloruro de sodio (NaCl 0.6M)”, que se realizó en el Instituto Tecnológico de Costa Rica en el II Semestre del 2024.

La Práctica Dirigida es un requisito académico del programa de Licenciatura en Ingeniería en Materiales de la Escuela de Ciencia e Ingeniería en Materiales del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Este documento ha sido declarado:

Públicos

Confidenciales



PhD. Jeimmy Cristina González Masís
Profesor Guía

Mariana Leiva Coto
Estudiante

MGP. Ronald Brenes Brenes
Profesor Lector

M.Sc. Fabián Araya Mora
Profesor Lector

M.Sc. Ricardo Esquivel Isern
Director Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales
Cartago, Abril, 2025

1.1.2. CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DEL PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN

El presente Proyecto Final de Graduación titulado “Evaluación de los extractos naturales de *Justicia Tinctoria* “Azul de Mata” y *Ganoderma Lucidum* “Hongo Ganoderma” como inhibidores de corrosión verdes en acero de bajo carbono en disoluciones de ácido clorhídrico (HCl 1M) y cloruro de sodio (NaCl 0.6M)”, durante el I Semestre de 2025, ha sido defendido, ante el Tribunal Examinador integrado por los profesores M.Sc Jeimmy Cristina González Masís, MGP. Ronald Brenes Brenes, M.Sc. Fabián Araya Mora; como requisito para optar al grado de Licenciatura en Ingeniería en Materiales de la Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Este documento y su defensa ante el Tribunal Examinador han sido declarados:

Públicos

Confidenciales



M.Sc Jeimmy Cristina González Masís
Profesor Guía

Mariana Leiva Coto
Estudiante

MGP. Ronald Brenes Brenes
Profesor Lector

M.Sc. Fabián Araya Mora
Profesor Lector

M. Sc. Ricardo Esquivel Isern
Director Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales
Cartago, Abril, 2025

1.1.3. CARTA DE ENTENDIMIENTO

Señor

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Biblioteca José Figueres Ferrer

Yo Mariana Leiva Coto carné 2019007715, autorizo (X) no autorizo () a la Biblioteca José Figueres del Instituto Tecnológico de Costa Rica disponer del Trabajo Final realizado por mi persona, con el título “Evaluación de los extractos naturales de Justicia Tintoria “Azul de Mata” y Ganoderma Lucidum “Hongo Ganoderma” como inhibidores de corrosión verdes en acero de bajo carbono en disoluciones de ácido clorhídrico (HCl 1M) y cloruro de sodio (NaCl 0.6M)”, para ser ubicado en el repositorio institucional y Catálogo SIBITEC para ser accesado a través de la red Internet.



Firma de estudiante

Mariana Leiva Coto

Cédula 1-1808-0344

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, quiero agradecer a Dios, por darme la fortaleza, paciencia y las oportunidades que me han permitido llegar hasta aquí. A mis papás por siempre esforzarse para darme las mejores herramientas, por confiar en mí incluso cuando yo no lo hacía, y por ser mi mayor fuente de apoyo. A Nana, por ser mi cómplice, su apoyo incondicional y por estar siempre ahí para escucharme. A Juli por siempre escucharme y apoyarme. A Emi, que, aunque aún no lo sabe, sus risas y ocurrencias me impulsan cada día a seguir creciendo.

A mis Titos, por siempre creer en mí, apoyarme y chinearne, por ser mis fans número uno y por celebrar cada uno de mis logros como si fueran propios. A Gerar, Fabi, Rebe, Mari, Macho y Dani, por siempre estar ahí para apoyarme, ayudarme y creer en mí.

A Beto y Jime, por ser un pilar fundamental en este proyecto y por haberse convertido en mi segunda familia lejos de casa. No pude haber elegido mejores personas para compartir esta experiencia. Gracias por cada risa y cada logro compartido. Sepan que de mi parte nunca les faltará un abrazo o palabras de aliento cuando las necesiten.

A mis amigos, los que estuvieron, los que están y los que continuarán estando, gracias por ser un gran apoyo en esta etapa de mi vida, por aguantar el estrés, compartir alegrías y frustraciones.

A todo el equipo del CENIM, por habernos recibido de la mejor manera, haciéndonos sentir como en casa, sacarnos una risa cuando más lo necesitábamos y por brindarnos su apoyo en cada paso de este proyecto.

A todas las personas del CIEMTEC, por haberme brindado grandes conocimientos a lo largo de los años y por su apoyo incondicional durante mi carrera. A María Badilla, por haber confiado en mí y en mis capacidades durante todos estos años como asistente, por su paciencia, por enseñarme y por estar siempre dispuesta a ayudarme. Gracias por brindarme grandes oportunidades a lo largo de estos años.

A Chiqui que me acompañó en la redacción de esta tesis durante sus últimos días.

ÍNDICE GENERAL

2. INTRODUCCIÓN.....	14
2.1. IDENTIFICACIÓN DE LA INSTITUCIÓN	14
2.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	14
2.3. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO.	15
2.4. IMPACTO SOCIOAMBIENTAL.....	15
2.5. OBJETIVOS DEL ESTUDIO.....	16
2.6. CURSOS RELACIONADOS.....	16
2.7. ALCANCES Y LIMITACIONES	17
3. MARCO TEÓRICO.....	19
3.1. CORROSIÓN EN MATERIALES METÁLICOS.....	19
3.2. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA CORROSIÓN EN MATERIALES METÁLICOS.....	19
3.3. TIPOS DE CORROSIÓN.....	21
3.4. ACERO BAJO EN CARBONO	22
3.5. INHIBIDORES DE CORROSIÓN	22
3.6. CLASIFICACIÓN DE LOS INHIBIDORES DE CORROSIÓN	23
3.7. FACTORES QUE AFECTAN LA EFICIENCIA DE LOS INHIBIDORES.....	24
3.8. INHIBIDORES DE CORROSIÓN VERDES	24
3.9. EXTRACTOS NATURALES	25
3.10. USO DE EXTRACTOS NATURALES EN INHIBIDORES DE CORROSIÓN.....	27
3.11. EVALUACIÓN DE INHIBIDORES DE CORROSIÓN.....	27
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	42
4.1. METODOLOGÍA PARA EL CUMPLIMIENTO DE OBJETIVOS.....	42
4.2. PREPARACIÓN DE DISOLUCIONES.....	44
4.3. PREPARACIÓN DE MUESTRAS	45
4.4. ANÁLISIS GRAVIMÉTRICO	50
4.5. ANÁLISIS ELECTROQUÍMICO	53

4.6.	PRUEBAS DE CARACTERIZACIÓN.....	55
5.	DESARROLLO Y RESULTADOS.....	59
5.1.	SOLUBILIDAD DEL EXTRACTO EN LOS MEDIOS.....	59
5.2.	PRUEBAS DE PÉRDIDA DE MASA POR INMERSIÓN.....	61
5.3.	PRUEBAS ELECTROQUÍMICAS.....	64
5.4.	MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN.....	78
6.	CONCLUSIONES.....	85
7.	RECOMENDACIONES.....	87
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	88
9.	APÉNDICES.....	99

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. ANTECEDENTES DE PLANTAS Y FRUTOS UTILIZADOS COMO INHIBIDORES DE CORROSIÓN.....	27
TABLA 2. COMPOSICIÓN DE LOS PRISMAS DE ACERO DE BAJO CARBONO UTILIZADO PARA ENSAYOS GRAVIMÉTRICOS.	46
TABLA 3. COMPOSICIÓN DE LAS LÁMINAS DE ACERO DE BAJO CARBONO UTILIZADO PARA ENSAYOS ELECTROQUÍMICOS.	47
TABLA 4. TASA DE CORROSIÓN Y EFICIENCIA DE INHIBICIÓN DE <i>GANODERMA LUCIDUM</i> EN MEDIO ÁCIDO HCL 1M A PARTIR DEL ENSAYO GRAVIMÉTRICO.....	62
TABLA 5. TASA DE CORROSIÓN Y EFICIENCIA DE INHIBICIÓN DE <i>GANODERMA LUCIDUM</i> EN NaCl 0.6M A PARTIR DEL ENSAYO GRAVIMÉTRICO.....	62
TABLA 6. RESULTADOS A PARTIR DE LAS CURVAS POTENCIODINÁMICAS DE HCL 1M CON DIFERENTES CONCENTRACIONES DE EXTRACTO DE HONGO <i>GANODERMA</i>	65
TABLA 7. PROMEDIO DE LA VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA DE POLARIZACIÓN (R_p) Y LA EFICIENCIA DE INHIBICIÓN (ηR_p) EN PRESENCIA DEL EXTRACTO DE <i>GANODERMA LUCIDUM</i> A PARTIR DE EIS POR CONCENTRACIÓN.....	68
TABLA 8. PROMEDIO DE LA VARIACIÓN DE LA CAPACITANCIA DE DOBLE CAPA Y LA EFICIENCIA DE INHIBICIÓN EN PRESENCIA DEL EXTRACTO DE <i>GANODERMA LUCIDUM</i>	68
TABLA 9. PARÁMETROS CALCULADOS PARA LA EVALUACIÓN DE LAS ISOTERMAS DE ADSORCIÓN DEL EXTRACTO DE <i>GANODERMA LUCIDUM</i> SOBRE ACERO EN HCL 1M.....	71
TABLA 10. EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AJUSTE EN LAS ISOTERMAS DE ADSORCIÓN PARA <i>GANODERMA LUCIDUM</i> EN HCL 1M.	72
TABLA 11. RESULTADOS A PARTIR DE LAS CURVAS POTENCIODINÁMICAS DE NaCl 0.6M CON DIFERENTES CONCENTRACIONES DE EXTRACTO DE HONGO <i>GANODERMA</i>	76
TABLA 12. CAMBIOS EN LA RUGOSIDAD DE LA SUPERFICIE TRAS ENSAYOS ELECTROQUÍMICOS EN LA DISOLUCIÓN DE <i>GANODERMA LUCIDUM</i> EN HCL 1M.....	81
TABLA 13. PRINCIPALES LONGITUDES DE ONDA ANALIZADAS A PARTIR DEL ESPECTRO FTIR.....	83
TABLA 14. RESULTADOS DE LAS PENDIENTES DE TAFEL DE LOS TRIPLICADOS PARA CADA CONCENTRACIÓN DE <i>GANODERMA LUCIDUM</i>	102
TABLA 15. RESULTADOS DE LA ESPECTROSCOPÍA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA (EIS).....	109
TABLA 16. PICOS ANALIZADOS EN EL ESPECTRO FTIR.....	110

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. FTIR DE GANODERMA LUCIDUM. [31]	26
FIGURA 2. EJEMPLO DE DIAGRAMA NYQUIST. ACERO AL CARBONO EN HCL 0.5M [43]	32
FIGURA 3. EJEMPLO DE DIAGRAMA DE BODE. ACERO AL CARBONO EN HCL 0.5M [43].....	33
FIGURA 4. EJEMPLO DE CURVAS DE POLARIZACIÓN, MOSTRANDO DIFERENTES CONCENTRACIONES DE INHIBIDOR NATURAL EN LA CORROSIÓN DE AISI 1019 EN MEDIO ÁCIDO [45]	34
FIGURA 5. MEDICIÓN DE MASA DEL EXTRACTO PARA LAS DISOLUCIONES.	45
FIGURA 6. LIJADO DE LÁMINAS DE ACERO.	47
FIGURA 7. MATERIALES MENCIONADOS EN EL MONTAJE DE MUESTRAS: (A) CABLES DE COBRE, (B) CINTA DE COBRE, (C) SACABOCADOS, (D) LACA. FUENTE: [ELABORACIÓN PROPIA]	48
FIGURA 8. MEDICIÓN DEL ÁREA DE ANÁLISIS CON EL MICROSCOPIO: A) TOMA DE MEDIDA. B) EQUIPO. FUENTE: [ELABORACIÓN PROPIA].....	49
FIGURA 9. PROCESO DE MONTAJE DE MUESTRAS: A) LIJADO, B) DELIMITADO DE ÁREA, C) SELLADO CON EPOXI MARCA ARALDITE, D) CONTACTO CON CABLE Y CINTA DE COBRE, E) SELLADO CON LACA SOBRE EL CONTACTO, F) SELLADO CON LACA DEL RESTO DE LA PLACA Y CINTA IMPERMEABLE. FUENTE: [ELABORACIÓN PROPIA].....	49
FIGURA 10. PROCEDIMIENTO DE LIMPIEZA DE MUESTRAS ANTES DEL ENSAYO GRAVIMÉTRICO.	50
FIGURA 11. IDENTIFICACIÓN DE LAS MEDIDAS TOMADAS DE LAS DIMENSIONES DE LOS PRISMAS.	51
FIGURA 12. MUESTRAS EN INMERSIÓN EN LAS DISOLUCIONES CON 1000 PPM DE EXTRACTO.	51
FIGURA 13. MONTAJE DE MUESTRAS PARA INMERSIONES: (A) SUJECCIÓN DE LA MUESTRA, (B) MONTAJE TOTAL.	52
FIGURA 14. DIAGRAMA DE LIMPIEZA FINAL DE LOS ENSAYOS GRAVIMÉTRICOS.	53
FIGURA 15. EQUIPO PARA LAS PRUEBAS ELECTROQUÍMICAS: (A) POTENCIOSTATO AUTOLAB, (B) CELDA MONTADA DENTRO DE LA CAJA DE FARADAY. FUENTE: [ELABORACIÓN PROPIA].....	54
FIGURA 16. ESPECTRÓMETRO DE EMISIÓN ÓPTICA EN EL CIEMTEC. FUENTE: [ELABORACIÓN PROPIA]	55
FIGURA 17. MATERIALES PARA LAS IMÁGENES DE SEM: (A) MUESTRAS INMERSAS UTILIZADAS, (B) HITACHI S-4800 MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO. FUENTES: [ELABORACIÓN PROPIA][59]	56
FIGURA 18. PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN DE RUGOSIDAD: (A) IDENTIFICACIÓN DEL ÁREA ANALIZADAS, (B)PERFILÓMETRO TIME TR200.....	57

FIGURA 19. FTIR SPECTRUM 400, MARCA PERKINELMER PRECISELY.	58
FIGURA 20. RESULTADOS DE INTENTO DE DISOLUCIÓN DEL EXTRACTO DE JUSTICIA TINTORIA: (A) DISOLUCIÓN EN HCL 1M, (B) DISOLUCIÓN EN NaCl 0.6 M. FUENTE: [ELABORACIÓN PROPIA].....	59
FIGURA 21. DISOLUCIÓN DE GANODERMA LUCIDUM A 1000 PPM. EN (A) HCL 1M, (B) NaCl 0.6 M. FUENTE: [ELABORACIÓN PROPIA].....	60
FIGURA 22. EXTRACTO PRECIPITADO EN LA DISOLUCIÓN DE NaCl 0.6 M CON 1000 PPM DE GANODERMA LUCIDUM A LAS 24 HORAS. FUENTE: [ELABORACIÓN PROPIA].....	61
FIGURA 23. MUESTRAS TRAS INMERSIÓN POR 24 HORAS. (A) HCL 1M, (B) HCL 1M CON 1000 PPM DE EXTRACTO DE H.GANODERMA, (C) NaCl 0.6M, (D) NaCl 1.6M CON1000 PPM DE EXTRACTO DE H.GANODERMA. FUENTE: [ELABORACIÓN PROPIA].....	63
FIGURA 24. CURVAS POTENCIODINÁMICAS PARA HCL 1M CON CONCENTRACIONES DE 0 PPM, 250 PPM, 500 PPM Y 1000 PPM DE GANODERMA LUCIDUM. FUENTE: [ELABORACIÓN PROPIA].....	64
FIGURA 25. DIAGRAMA DE NYQUIST PARA HCL 1M CON CONCENTRACIONES DE 0 PPM, 250 PPM, 500 PPM Y 1000 PPM DE GANODERMA LUCIDUM. FUENTE: [ELABORACIÓN PROPIA].....	67
FIGURA 26. BODE: MÓDULO DE IMPEDANCIA RESPECTO A LA FRECUENCIA PARA HCL 1M CON CONCENTRACIONES DE 0PPM, 250PPM, 500PPM Y 1000PPM DE H.GANODERMA. FUENTE: [ELABORACIÓN PROPIA].....	69
FIGURA 27. DIAGRAMA DE BODE: ÁNGULO DE FASE RESPECTO FRECUENCIA PARA HCL 1M CON CONCENTRACIONES DE 0PPM, 250PPM, 500PPM Y 1000PPM DE H.GANODERMA. FUENTE: [ELABORACIÓN PROPIA].....	70
FIGURA 28. ISOTERMAS. (A) LANGMUIR. (B) FREUNDLICH. FUENTE: [ELABORACIÓN PROPIA]	73
FIGURA 29. ISOTERMA SEGÚN EL MODELO DE TEMKIN. FUENTE: [ELABORACIÓN PROPIA].....	74
FIGURA 30. CURVAS POTENCIODINÁMICAS PARA NaCl 0.6 M CON CONCENTRACIONES DE 0 PPM, 500 PPM Y 1000 PPM DE GANODERMA LUCIDUM. FUENTE: [ELABORACIÓN PROPIA].....	75
FIGURA 31. IMÁGENES DE MUESTRAS INMERSAS DURANTE CUATRO DÍAS EN HCL 1M (SEM), CON DIFERENTES MAGNIFICACIONES: (A)200X, (B)1.000X, (C)10.000X, (D)25.000X.....	78
FIGURA 32. IMÁGENES DE MUESTRAS INMERSAS POR CUATRO DÍAS EN HCL 1M CON 1000PPM H.GANODERMA (SEM), CON DIFERENTES MAGNIFICACIONES (A)200X, (B)1.000X, (C)10.000X, (D)25.000X. FUENTE: [ELABORACIÓN PROPIA]	79
FIGURA 33. ESPECTRO DE FTIR DEL EXTRACTO PURO CON SUS PICOS IDENTIFICADOS.....	82

FIGURA 34. COMPARACIÓN DE LOS ESPECTROS DE FTIR DEL EXTRACTO DE GANODERMA LUCIDUM PURO RESPECTO
EL EXTRACTO DISUELTO EN HCL 1M. 84

ÍNDICE DE APÉNDICES

APÉNDICE 1. PREPARACIÓN DEL DECAPADO A BASE DE ÚROTROPINA.....	99
APÉNDICE 2. CURVAS DE POLARIZACIÓN TRIPLICADAS POR CONCENTRACIÓN. FUENTE: [ELABORACIÓN PROPIA] ...	100
APÉNDICE 3. RESULTADOS DE TAFEL A PARTIR DE LAS CURVAS DE POLARIZACIÓN.....	102
APÉNDICE 4. DIAGRAMAS DE NYQUIST TRIPLICADOS POR CONCENTRACIÓN.	103
APÉNDICE 5. DIAGRAMAS DE BODE TRIPLICADOS POR CONCENTRACIÓN. (IMPEDANCIA VS FRECUENCIA) FUENTE: [ELABORACIÓN PROPIA]	105
APÉNDICE 6. DIAGRAMAS DE BODE POR TRIPLICADO. (ÁNGULO DE FASE VS FRECUENCIA). FUENTE: [ELABORACIÓN PROPIA].....	107
APÉNDICE 7. RESULTADOS CUANTITATIVOS A PARTIR DE LA EIS.....	109
APÉNDICE 8. ANÁLISIS COMPLETO DEL ESPECTRO FTIR OBTENIDO.	110

2. INTRODUCCIÓN

2.1. Identificación de la institución

Este proyecto surgió de una colaboración entre el Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), el Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM) en España, la Universidad Nacional de Costa Rica (UNA) y la Universidad Estatal a Distancia (UNED). El trabajo experimental se desarrolló principalmente en el Departamento de Corrosión y Protección de Materiales Metálicos (COPROMAT) del CENIM. En este proceso, se contó con el apoyo de la PhD. María Ángeles Arenas Vara, quien brindó asesoría técnica en cada etapa, el PhD. Juan José de Damborenea González, experto en corrosión e inhibidores, y de la PhD. Ana Conde del Campo, quien participó activamente en el diseño experimental y el análisis de resultados. Uno de los aspectos clave del proyecto fue la producción de extractos naturales de *Justicia Tinctoria* (“Azul de Mata”) y *Ganoderma Lucidum* (“Hongo Ganoderma”) en la UNA. Estos extractos fueron evaluados bajo condiciones controladas para analizar su desempeño en medios corrosivos y su potencial como inhibidores naturales.

2.2. Descripción del problema

La corrosión de materiales metálicos es un problema crítico en diversas industrias, causando pérdidas económicas significativas año con año. Según estimaciones de NACE International (Asociación Nacional de Ingenieros en Corrosion), la corrosión genera costos globales de aproximadamente 2,5 billones de dólares anuales, lo que equivale al 3,4% del PIB mundial [1]. En países como México, estas pérdidas ascienden a 13.500 millones de dólares al año, considerando gastos en mantenimiento, reemplazo de estructuras y disminución de la productividad [1], [2]. Para mitigar este fenómeno, se han desarrollado inhibidores de corrosión químicos, los cuales protegen las superficies metálicas de la oxidación. Sin embargo, la mayoría de estos compuestos son sintéticos, tóxicos y contaminantes, lo que ha generado la necesidad de buscar alternativas más sostenibles. Este proyecto propone el uso de extractos naturales como inhibidores de corrosión verdes, aprovechando plantas y biomasa para reducir el impacto ambiental. Se evaluarán los extractos de *Justicia Tinctoria* y *Ganoderma Lucidum* en muestras de acero de bajo carbono, bajo condiciones controladas en medios corrosivos. Las pruebas se

realizarán en medio ácido (HCl 1M) y medio neutro (NaCl 0.6M), permitiendo analizar su efectividad y capacidad de protección frente a la corrosión.

2.3. Justificación del estudio.

La justificación de este proyecto se fundamenta en la necesidad de desarrollar métodos de protección contra la corrosión en materiales metálicos que sean sostenibles y menos perjudiciales para el medio ambiente. Actualmente, las industrias que dependen de componentes metálicos enfrentan pérdidas económicas significativas cada año a causa de deterioro del material metálico, causado por la corrosión en ambientes agresivos. Para combatir este problema, se ha recurrido al uso de inhibidores de corrosión químicos. Sin embargo, muchos de estos compuestos son sintéticos, presentan toxicidad elevada, generan residuos contaminantes, y contribuyen al deterioro ambiental, afectando la salud humana. A partir de esto, el proyecto se justifica en la búsqueda de alternativas amigables con el medio ambiente que puedan ofrecer protección anticorrosiva sin el alto impacto negativo que generan los inhibidores sintéticos. Los extractos naturales, provenientes de fuentes renovables como plantas y biomasa, representan una opción viable y sostenible, ya que muchos de ellos poseen compuestos bioactivos con propiedades antioxidantes y capacidad para formar capas protectoras sobre superficies metálicas. Partiendo de esa problemática, este proyecto evaluará el potencial inhibitorio de extractos de Justicia Tintoria ("Azul de Mata") y Ganoderma Lucidum ("Hongo Ganoderma"), cuya eficacia será estudiada en condiciones ácidas y neutras en placas metálicas de acero de bajo carbono. Estos extractos no solo representan una alternativa más segura y sostenible, sino que también promueven el uso de recursos naturales y subproductos agrícolas, lo que podría tener implicaciones positivas para las economías locales y la reducción de residuos.

2.4. Impacto Socioambiental

El proyecto de investigación, enfocado en la evaluación de extractos naturales de Justicia Tintoria ("Azul de Mata") y Ganoderma Lucidum ("Hongo Ganoderma") como inhibidores de corrosión, tiene un impacto socioambiental significativo. Por un lado, incentiva la sostenibilidad, ya que promueve el uso de recursos naturales renovables, contribuyendo a reducir la dependencia de inhibidores sintéticos que suelen ser tóxicos, contaminantes, y de difícil degradación. Además, la implementación de alternativas naturales ayuda a disminuir la contaminación de suelos y aguas,

dado que los extractos son menos duraderos en el ambiente, fomentando la innovación científica, promoviendo soluciones sostenibles en el campo de la corrosión.

2.5. Objetivos del Estudio

Objetivo General

Evaluar la viabilidad de los extractos naturales de *Justicia Tinctoria* (“Azul de Mata”) y *Ganoderma Lucidum* (“Hongo Ganoderma”) como inhibidores de corrosión en muestras de acero de bajo carbono, considerando su eficiencia en medio ácido (HCl 1M) y neutro (NaCl 0.6M), mediante la aplicación de ensayos gravimétricos y electroquímicos.

Objetivos Específicos

Determinar la eficiencia de inhibición de los extractos naturales de *Justicia Tinctoria* (“Azul de Mata”) y *Ganoderma Lucidum* (“Hongo Ganoderma”) en medios ácido y neutro, bajo distintas concentraciones, mediante ensayos gravimétricos, siguiendo las normas ASTM G1 y ASTM G31.

Evaluar la eficiencia de los extractos de *Justicia Tinctoria* (“Azul de Mata”) y *Ganoderma Lucidum* (“Hongo Ganoderma”) como inhibidores de corrosión mediante pruebas electroquímicas en medios ácido y neutro, de acuerdo con las normas ASTM G3 y ASTM G102.

Identificar la concentración óptima de los extractos de *Justicia Tinctoria* (“Azul de Mata”) y *Ganoderma Lucidum* (“Hongo Ganoderma”) que presenten la mayor eficiencia inhibidora en medios ácido y neutro.

Aplicar técnicas de caracterización para analizar la composición de los extractos utilizados y la morfología de la superficie de las muestras de acero de bajo carbono, empleando microscopía electrónica de barrido (SEM), espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) y microscopía óptica.

2.6. Alcances y Limitaciones

a. Alcances

El proyecto tiene como objetivo principal evaluar el uso de extractos naturales de *Justicia Tinctoria* y *Ganoderma Lucidum* como inhibidores de corrosión verde. Para ello, se desarrollarán diversas actividades que abarcan tanto el análisis experimental como la evaluación técnica.

En primer lugar, se realizará una revisión bibliográfica detallada para investigar el comportamiento de los inhibidores de corrosión verdes y explorar el potencial de estas dos especies como alternativas sostenibles frente a los inhibidores sintéticos. Posteriormente, se llevarán a cabo pruebas gravimétricas para determinar la pérdida de masa de las muestras metálicas de acero de bajo carbono en presencia y ausencia de los extractos, permitiendo evaluar su eficiencia inhibidora en medios ácido y neutro bajo diferentes concentraciones y tiempos de exposición.

Además, se realizarán pruebas electroquímicas, como curvas potenciodinámicas e impedancia electroquímica, para complementar el análisis de eficiencia en las mismas condiciones experimentales. También se analizará la cinética de corrosión, evaluando cómo varía la velocidad de corrosión en función de la presencia de los inhibidores.

b. Limitaciones

El proyecto enfrenta ciertas limitaciones, siendo una de las principales, la disponibilidad de las materias primas (*Justicia Tinctoria* y *Ganoderma Lucidum*) en cantidades suficientes, ya que estas especies no cuentan con comercialización a gran escala, ya que estas son utilizadas principalmente con fines medicinales y artesanales.

Otra limitación es que los extractos naturales son producidos por personas de la Universidad Nacional (UNA), lo que podría ocasionar que no se disponga de la cantidad suficiente de extracto para todas las pruebas del proyecto. Adicionalmente, los extractos son mezclas heterogéneas de compuestos químicos, lo que complica la identificación precisa de los componentes activos responsables de la inhibición, incluso utilizando técnicas como FTIR.

Finalmente, la reproducibilidad de los resultados podría verse afectada por variaciones en la composición química de las plantas y hongos, dependiendo de las condiciones de cultivo, los

métodos de extracción y los parámetros experimentales empleados, tanto en las pruebas gravimétricas como electroquímicas.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Corrosión en materiales metálicos

La corrosión es un proceso de deterioro y degradación de materiales generado por la interacción del material con su entorno, afectando a los materiales incluyendo metales, polímeros, cerámicos y compuestos [3][4]. Este fenómeno causa grandes pérdidas económicas debido a la pérdida de producto, contaminación, reducción de la eficiencia y suspensión de funciones industriales. La corrosión no afecta solamente la superficie del material, puede también afectar la estructura interna, resultando en fallos catastróficos e inesperados [5].

3.2. Factores que influyen en la corrosión en materiales metálicos

3.2.1. Composición química

La susceptibilidad a la corrosión varía según la composición de elementos presentes en las aleaciones[5]. Elementos como el cromo en aceros inoxidable genera películas pasivantes protectoras; por otro lado, elementos como el níquel, cobre y zinc generan cambios en el potencial electroquímico, afectando así la resistencia a la corrosión del material [6][7]. Asimismo, la presencia de impurezas y defectos en las aleaciones, generan zonas más propensas a la corrosión.

3.2.2. Condiciones ambientales

Factores como la humedad, contaminantes atmosféricos, el pH y microorganismos aceleran el proceso corrosivo en los materiales metálicos [5]. En el caso de la humedad, el agua actúa como electrolito, favoreciendo las reacciones electroquímicas; por otro lado, la presencia de oxígeno y sales benefician el proceso de corrosión aumentando la formación de óxidos [8][9]. Por último, el pH del medio puede acelerar la corrosión, ya que ambientes ácidos o básicos, disuelven la capa protectora exponiendo el metal [3].

3.2.3. Condición superficial

Las discontinuidades en las superficies aumentan el área de contacto con el medio, favoreciendo las reacciones electroquímicas, estas irregularidades atrapan burbujas de hidrógeno o productos de corrosión, generando puntos preferenciales para la corrosión y aumentando la

velocidad de degradación del material [10]. Procesos como el mecanizado y conformado suelen causar tensiones superficiales en el material, favoreciendo la formación de discontinuidades en la superficie [11]. Los recubrimientos y capas protectoras pueden reducir la velocidad de la corrosión, protegiendo el material, sin embargo, cuando estas se dañan o degradan, el material será expuesto al medio [12].

3.2.4. Temperatura

Al aumentar la temperatura, se incrementa la energía cinética de las partículas, acelerando las reacciones de reducción-oxidación necesarias para el proceso corrosivo [5]. Asimismo, estos cambios afectan la estabilidad de películas de pasivado, descomponiéndolas, volviendo el material más susceptible a la corrosión [13].

3.2.5. Tiempo

La exposición prolongada a ambientes corrosivos deteriora las propiedades del material; sin embargo, la velocidad de corrosión no será siempre constante ya que puede disminuir debido a la formación de productos de corrosión en la superficie que actúan como capas protectoras, sin embargo, volverá a aumentar cuando esta capa se rompa [14]. Asimismo, el tiempo afecta el tipo de corrosión, ya que puede variar entre corrosión uniforme y localizada; variando la penetración de corrosión [15].

3.2.6. Diferencia de potencial eléctrico

La diferencia de potencial entre dos metales que se encuentran en contacto con un electrolito genera una celda electroquímica [3]. En la celda, el metal con potencial más bajo funciona como ánodo y el otro como cátodo, esta diferencia genera una corriente eléctrica que fluye a través del electrolito transfiriendo electrones del ánodo al cátodo [14]. Al suceder la reacción redox, el ánodo se oxida, disolviendo el metal y liberando electrones, mientras en el cátodo se unen los electrones con elementos presentes en el electrolito [14]. La diferencia de potencial acelera notablemente la corrosión del ánodo; protegiendo el material catódico, retrasando el proceso de corrosión [14].

3.3. Tipos de corrosión

3.3.1. Corrosión uniforme

Este tipo de corrosión afecta toda la superficie de forma homogénea; generando mayor pérdida de material [3]. Este tipo de corrosión es más común en metales sin elementos inoxidables (cromo o níquel); aparece por la existencia de impurezas, ya que generan diferencias de potencial, creando pequeños electrodos en la superficie, beneficiando las reacciones electroquímicas [3].

3.3.2. Corrosión localizada por picadura

Esta corrosión se presenta como pequeños orificios en la superficie debido a la presencia de aniones agresivos como cloruros que rompen las capas protectoras; estas picaduras pueden tener diferentes formas y diámetros [14]. Son las responsables del avance del proceso de corrosión en el material.

3.3.3. Corrosión localizada por grietas

Este tipo de corrosión se genera al atacar espacios cerrados y pequeños como hendiduras [16]. La diferencia de potencial favorece este tipo de corrosión ya que la zona de la grieta se toma como ánodo y la superficie como cátodo, acumulando iones corrosivos como cloruros, lo que acelera el proceso de corrosión [3]. Este tipo es difícil de detectar ya que se oculta en las hendiduras, generando perforaciones internas y fracturas aunque la superficie se encuentre en buen estado a simple vista [16].

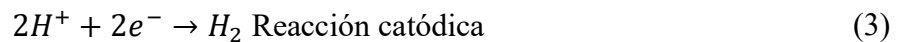
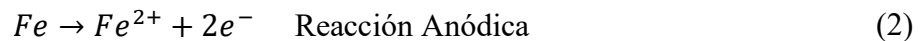
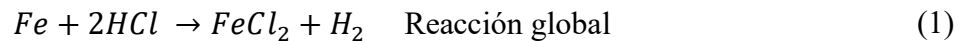
Corrosión localizada intergranular y transgranular

La corrosión intergranular afecta los bordes de los granos del material, favoreciéndose por tratamientos térmicos o tensiones a partir de esfuerzos mecánicos, especialmente en medios salinos (con cloruros o sulfuros); se puede evitar al asegurar la homogeneidad del material, como aceros inoxidables austeníticos estabilizados con titanio o molibdeno, o aceros con muy bajo contenido de carbono [14]. Por otro lado, la corrosión transgranular afecta directamente los granos del material generando grietas que los atraviesan [14]. Este tipo de corrosión está influenciado por la composición química del material, los defectos presentes en su estructura cristalina y la presencia de iones agresivos, como cloruros o sulfuros, en el medio electrolítico [3]. Este tipo de grietas se

favorece cuando el material cuenta con esfuerzos mecánicos aplicados que generan tensiones en el material [14].

3.4. Acero bajo en carbono

Los aceros de bajo carbono son materiales ampliamente utilizados en diversas industrias debido a su buena ductilidad, maleabilidad y facilidad de fabricación. Estos aceros poseen un contenido reducido de carbono, generalmente inferior al 0.30%, lo que les otorga propiedades específicas tanto mecánicas como electroquímicas [17]. En términos de resistencia a la corrosión, los aceros de bajo carbono no destacan particularmente debido a su composición química simple y la ausencia de elementos de aleación que mejoren esta propiedad, como el cromo o el níquel. Al ser materiales predominantemente ferrosos, son susceptibles a la oxidación en ambientes agresivos, especialmente en condiciones húmedas o expuestas a agentes químicos como cloruros o ácidos [17]. En (1) y (4) se presentan las reacciones globales para materiales mayormente ferrosos tanto en ácido clorhídrico como en cloruro de sodio, respectivamente. Adicionalmente, en (2) y (5) se muestran las reacciones anódicas de los sistemas y (3) y (6) como las reacciones catódicas.



3.5. Inhibidores de corrosión

Son sustancias químicas que se añaden en pequeñas cantidades en un medio corrosivo con el fin de disminuir significativamente la velocidad de corrosión del material metálico [18]. Estos son ampliamente utilizados en la industria debido a su eficacia para prolongar la vida útil de los materiales, reducir costos de mantenimiento y prevenir fallas inesperadas [18]. Los inhibidores

ofrecen una solución económica y práctica para prevenir el deterioro del material en comparación con métodos más costosos o complejos como recubrimientos o diseño de materiales más resistentes a la corrosión.

3.6. Clasificación de los inhibidores de corrosión

3.6.1. Naturaleza

Los inhibidores se pueden clasificar de dos formas debido a su naturaleza. Cuando se habla de inhibidores derivados de compuestos químicos, se denominan inhibidores sintéticos, los cuales suelen presentar alta efectividad, pero tienden a tener impactos sumamente negativos en el medio ambiente[14]. Por otro lado, cuando el inhibidor se obtiene a partir de fuentes naturales, como biomasa o residuos, se denominan inhibidores verdes, abriendo paso a alternativas orgánicas, biodegradables y sostenibles[14].

3.6.2. Mecanismo de acción

Estos se pueden clasificar de 3 formas cuando se habla de mecanismos de acción. Cuando el inhibidor reduce la velocidad de reacción de la oxidación en el ánodo abriendo paso a la formación de una capa pasiva se identifica como anódico[19]. Por otro lado, cuando su forma de trabajo es mediante la disminución de la reacción de reducción en el cátodo, bloqueando la transferencia de electrones para la oxidación, se denomina como catódico[19]. Sin embargo, existen inhibidores que actúan tanto en el ánodo como en el cátodo, protegiendo al material en ambas situaciones.

3.6.2.1. Formando una película protectora

Este tipo de inhibidor funciona adsorbiéndose a la superficie metálica por medio de enlaces de hidrogeno o fuerzas de Van der Waals, generando una barrera entre el material y el medio corrosivo [18]. Usualmente, los inhibidores a base de plantas generan capas protectoras por medio de enlaces de hidrogeno debido a sus compuestos bioactivos.

3.6.2.2. Modificando las reacciones electroquímicas

Los inhibidores pueden modificar las reacciones electroquímicas de los materiales. En las reacciones catódicas, los inhibidores interfieren en la transferencia de electrones en zonas activas de la superficie, reduciendo la velocidad de la reacción de oxidación [12], [14]. En las reacciones anódicas, generan una capa pasiva en el metal, lo cual dificulta la corrosión del material; es posible que el inhibidor reduzca la concentración de iones en la disolución, disminuyendo la velocidad de corrosión [14].

3.6.2.3. Adsorción en zonas activas

Este mecanismo puede funcionar por medio de bloqueo de sitios de nucleación, donde el inhibidor se adsorbe en la zona activa de la superficie del material, justo donde inician las reacciones del proceso de corrosión [20]. También, se puede dar por medio de la formación de una doble capa eléctrica donde la adsorción modifica la estructura en la doble capa, justo en la interfase entre el metal y electrolito, dificultando el paso de iones, retrasando el proceso de corrosión [14].

3.7. Factores que afectan la eficiencia de los inhibidores

La eficiencia de los inhibidores de corrosión depende de factores como su concentración óptima para maximizar su desempeño; la temperatura, que puede descomponer ciertos inhibidores, aunque algunos, naturales, mantienen su estabilidad; y el pH del medio, ya que ambientes muy ácidos o básicos pueden dificultar la formación de capas protectoras[3]. Además, la naturaleza del metal influye en la interacción con el inhibidor, siendo más favorable en metales con elementos que forman películas pasivas, como el cromo. Estos factores deben evaluarse cuidadosamente para asegurar la efectividad del inhibidor en condiciones específicas[3].

3.8. Inhibidores de corrosión verdes

Estos inhibidores son sustancias de fuente natural, como plantas o biomasa, que reducen la velocidad de corrosión de metales en medios corrosivos; se ha impulsado su uso debido a su menor impacto ambiental en comparación con los inhibidores químicos [21]. Estos al igual que un inhibidor convencional, actúan formando películas protectoras sobre la superficie, modificando las reacciones electroquímicas o adsorbiéndose en los sitios activos de corrosión, con la diferencia

de que son biodegradables y de baja toxicidad [18]. Al evaluar la capacidad inhibidora de un extracto natural, se deben considerar factores como la concentración, el tipo de metal y el medio corrosivo, empleando técnicas electroquímicas y gravimétricas para cuantificar la eficacia del inhibidor [22], [23].

3.9. Extractos Naturales

Un extracto natural es la esencia concentrada que se obtiene de plantas, frutas, flores o raíces, estos cuentan con gran cantidad de aplicaciones, desde medicamentos naturalistas o como saborizantes en la industria alimentaria [24]. Estos han demostrado tener gran potencial como alternativa para la inhibición de corrosión; debido a la presencia de compuestos orgánicos con propiedades antioxidantes que generan una película protectora [24]. Sin embargo, esta no es la única forma de protección que brindan, ya que pueden funcionar por medio de adsorción, adhiriendo átomos, iones o moléculas a la superficie del material o por medio de la neutralización de radicales que se encuentran en el electrolítico acelerando la corrosión [25]. Algunas de las ventajas del uso de estos extractos son sus costos, ya que muchas veces son más económicos que los inhibidores sintéticos, son amigables con el ambiente y renovables.

Justicia Tinctoria “Azul de Mata”

La *Justicia Tinctoria* es una planta distribuida en diferentes regiones de Centroamérica, incluyendo países como Nicaragua, Honduras, Guatemala y Costa Rica, principalmente en zonas altas debido a su adaptabilidad a diversas condiciones climáticas [26]. Algunos de sus principales usos son: obtención de tinte y medicinas naturales, utilizado para tratar inflamaciones y problemas en la piel [27]. La *Justicia Tinctoria* es de gran importancia económica para algunas comunidades costarricenses, en especial para aquellas que se dedican a la producción artesanal; adicionalmente, el cultivo de azul de mata es una gran fuente de empleo en algunas comunidades [27].

Asimismo, es de gran importancia resaltar que no se encuentran registros de que esta planta haya sido utilizada previamente como inhibidor de corrosión. Debido a esto, no se encuentran análisis previos de sus grupos funcionales o caracterización profunda de sus componentes.

Ganoderma Lucidum “Hongo Ganoderma”

Ganoderma Lucidum, conocido comúnmente como "Hongo Ganoderma" o "Reishi", es un hongo con una distribución amplia en regiones tropicales y subtropicales de Asia, América y Europa. Principalmente ha sido utilizado en la medicina oriental, en países como China, Japón y Corea, donde se utiliza por sus efectos antioxidantes, antiinflamatorios y antitumorales. En los últimos años, su cultivo y estudio han ganado relevancia en América Latina, impulsado por su potencial en aplicaciones biotecnológicas [28], [29].

Aunque este hongo ha sido objeto de múltiples investigaciones científicas, recientemente se ha comenzado a explorar su uso como inhibidor de corrosión. Estudios iniciales sugieren que el extracto de *Ganoderma Lucidum* puede alcanzar eficiencias superiores al 90 % en la protección de acero al carbono en ácido sulfúrico, demostrando que tiene un gran potencial para desarrollar alternativas sostenibles en el control de la corrosión [29].

En la **Figura 1** se muestra el espectro de FTIR de *Ganoderma Lucidum* en el cual se observa la presencia de fenoles, polisacáridos, terpenoides y proteínas, los cuales favorecen la capacidad inhibidora del extracto. Este tipo de compuestos permiten la adsorción sobre la superficie metálica, reduciendo la interacción del medio corrosivo con la superficie, reduciendo la velocidad de corrosión del sistema [30].

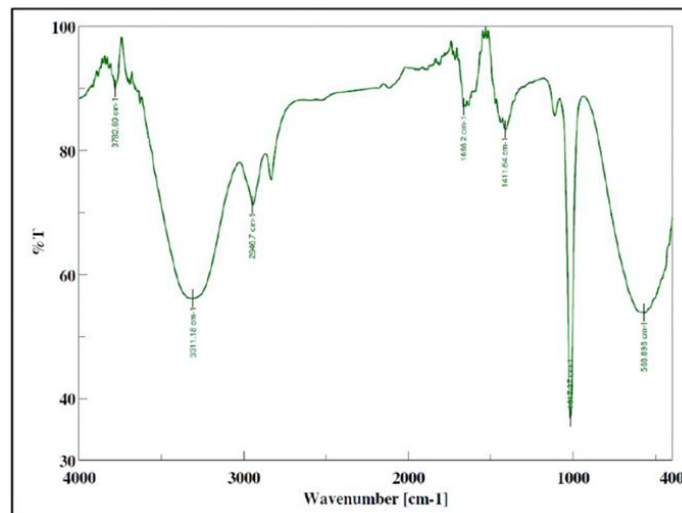


Figura 1. FTIR de Ganoderma Lucidum. [31]

3.10. Uso de extractos naturales en inhibidores de corrosión

En algunos artículos se ha identificado que, compuestos como taninos, flavonoides, alcaloides, terpenos y saponinas, son los que brindan propiedades inhibitoras a los extractos naturales. Para identificar estos compuestos, se aplican análisis fitoquímicos como técnicas de cromatografía y espectroscópicas. En la **Tabla 1** se muestran algunas de las plantas que han sido estudiadas previamente por sus propiedades inhibitoras de corrosión.

Tabla 1. Antecedentes de plantas y frutos utilizados como inhibidores de corrosión.

Nombre	Nombre científico	Propiedades
Ajo	Allium sativum	Componentes antioxidantes y promueve formación de capas protectoras
Romero	Rosmarinus officinalis	Compuestos antioxidantes y moléculas que se unen con iones metálicos
Naranja	Citrus sinensis	Compuestos que forman capas protectoras
Café	Coffea arabica	Compuestos fenólicos que actúan como inhibidores de corrosión

Fuente: Adaptado de [18], [31], [32], [33].

3.11. Evaluación de inhibidores de corrosión

3.11.1. Normas aplicadas

Para la evaluación de los extractos de *Justicia Tinctoria* y *Ganoderma Lucidum* como inhibidores de corrosión se utilizaron normas, ya que estas brindan procedimientos claros para cada ensayo aplicado, beneficiando la confiabilidad y reproducibilidad de los resultados. Estas normas permiten comparar los efectos inhibitoras en distintas condiciones experimentales y garantizar que los métodos empleados cumplan con los criterios de referencia en estudios de corrosión.

La norma ASTM G1-03 “Procedimiento para la Preparación, Limpieza y Evaluación de Corrosión en Muestras Metálicas” explica los procesos para preparar, limpiar y aplicar las pruebas por medio de pérdida de masa de las muestras (ensayos gravimétricos), generando una mayor

confiabilidad y repetibilidad en las pruebas [34]. Por otro lado, la norma ASTM G3-21 “Práctica Estándar para Convenciones Aplicables a Mediciones Electroquímicas en Pruebas de Corrosión” proporcionando directrices generales sobre la realización de mediciones electroquímicas en estudios de corrosión, asegurando la reproducibilidad de las pruebas electroquímicas [23]. De igual manera, se utilizó la norma ASTM G31 “Práctica Estándar para Pruebas de Corrosión de Metales por Inmersión En Laboratorio.” proporcionando directrices claras sobre la aplicación de las pruebas de inmersión en soluciones acuosas para evaluar la corrosión en materiales metálicos [35]. Por último, la norma ASTM G102 “Método para Cálculo de Tasas de Corrosión a partir de Datos Electroquímicos.” Muestra los procedimientos necesarios y las ecuaciones para obtener la tasa de corrosión a partir de los resultados de las pruebas electroquímicas [22].

3.11.2. Ensayos gravimétricos

Los ensayos gravimétricos son una técnica fundamental para evaluar la efectividad de inhibidores de corrosión. Este método consiste en medir la pérdida de masa de muestras metálicas tras ser expuestas a un medio corrosivo durante un tiempo determinado. La pérdida de masa se utiliza para calcular parámetros, como la tasa de corrosión y la eficiencia del inhibidor, proporcionando información directa sobre el grado de protección que el inhibidor ofrece [36]. Al aplicar estas pruebas es importante realizar la prueba sin el inhibidor como dato de referencia y con el inhibidor para comparar sus comportamientos y efectos en el material estudiado.

Las pruebas se realizaron en un ambiente controlado, donde se registraron tanto la temperatura como el tiempo de exposición de las muestras al medio corrosivo. Es fundamental que las muestras estén adecuadamente preparadas, asegurando que su superficie sea uniforme y que su masa inicial sea medida con precisión antes de la inmersión. Al finalizar el periodo de exposición, las muestras fueron retiradas del medio corrosivo, lavadas y secadas cuidadosamente para eliminar cualquier residuo superficial. Posteriormente, se midió nuevamente su masa, lo que permitió determinar la pérdida de masa y evaluar el grado de corrosión sufrido por el material [23].

Los resultados obtenidos permiten calcular la tasa de corrosión, la cual es la medida de la velocidad a la que un material se degrada debido a las reacciones químicas en su entorno. Este parámetro cuantifica la pérdida de material en función del tiempo, usualmente se expresa en

micrómetros por año ($\mu\text{m}/\text{año}$) o milímetros por año ($\text{mm}/\text{año}$) [29]. Esta se calcula utilizando (7) [36].

$$CR = \frac{8,76 \times 10^4 * \Delta m}{\rho * A * t} \quad (7)$$

Donde:

Δm : pérdida de masa del material en gramos ($m_{inicial} - m_{final}$)

ρ : densidad del material en gramos por centímetro cúbico ($\frac{g}{\text{cm}^3}$)

A: área expuesta del material en centímetros cuadrados (cm^2)

t: tiempo de exposición de la muestra en horas

Otro parámetro que se obtiene a partir de las pruebas gravimétricas es la eficiencia de inhibición, el cual es un parámetro que mide la capacidad de un inhibidor para reducir la tasa de corrosión (CR) de un material en un medio agresivo [23]. Este valor se expresa en términos de porcentajes, representando que tan efectivo es el inhibidor protegiendo el material, es posible calcularlo utilizando (8) [23].

$$E_{inh} = \frac{CR_{sin} - CR_{con}}{CR_{sin}} * 100 \quad (8)$$

Donde:

E_{inh} : eficiencia del inhibidor en porcentaje (%)

CR_{sin} : tasa de corrosión sin inhibidor ($\mu\text{m}/\text{año}$)

CR_{con} : tasa de corrosión con inhibidor ($\mu\text{m}/\text{año}$)

3.11.3. Electroquímica

La electroquímica estudia la relación entre las reacciones químicas y la energía eléctrica [37]. En el contexto de la corrosión de materiales metálicos, la electroquímica proporciona una base fundamental para comprender los procesos que ocurren en la interfase metal-electrolito. La corrosión, esencialmente, es un fenómeno electroquímico que implica la transferencia de electrones, dando lugar a la reacción anódica, donde ocurre la oxidación del metal y a la reacción catódica, que generalmente implica la reducción de especies presentes en el medio corrosivo [37].

En el caso de la corrosión de materiales metálicos, los principios electroquímicos permiten explicar cómo los metales son afectados por la presencia de un medio agresivo. Este fenómeno es impulsado por las reacciones redox, donde el metal actúa como ánodo, liberando electrones y formando iones metálicos. Al mismo tiempo, en el cátodo tienen lugar reacciones de reducción, que dependen del entorno corrosivo, como la reducción de oxígeno o de protones en medios ácidos.

La electroquímica proporciona herramientas experimentales como el seguimiento del potencial a circuito abierto (OCP), la polarización potenciodinámica y la espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS), que permiten caracterizar y analizar el comportamiento de los sistemas metálicos frente a la corrosión [38]. Estas técnicas son fundamentales para evaluar la efectividad de inhibidores de corrosión, ya que ofrecen información sobre parámetros clave como el potencial de corrosión, la densidad de corriente de corrosión y las reacciones involucradas.

3.11.3.1. Potencial de Circuito Abierto (OCP)

El Potencial de Circuito Abierto (Open Circuit Potential OCP) es una medida básica electroquímica que representa el potencial eléctrico de un electrodo cuando no circula corriente entre él y el electrolito, reflejando el equilibrio entre las reacciones redox que ocurren en la interfase electrodo-electrolito [39].

Esta medición es esencial para comprender el comportamiento electroquímico de materiales metálicos en diferentes medios. En estudios de corrosión, esta medida brinda información sobre la tendencia de un metal a corroerse en el medio específico [39]. Cuando los valores del potencial tienden a valores más negativos indica una mayor susceptibilidad a la corrosión, mientras que un desplazamiento hacia valores más positivos sugiere una mayor resistencia, esto ayuda a evaluar la efectividad de los inhibidores de corrosión ya que al añadir un inhibidor, las medidas del OCP pueden sufrir un desplazamiento, indicando cambios en la actividad electroquímica [39]. Estas mediciones pueden verse afectadas por la composición del electrolito y la temperatura durante el ensayo, por lo que es importante controlar las condiciones experimentales y permitir que el sistema alcance el equilibrio antes de iniciar la medición de OCP [39].

3.11.3.2. Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS)

La Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS) es una técnica empleada para estudiar los procesos electroquímicos que ocurren en la interfase metal-electrolito, como la corrosión de materiales metálicos y la evaluación de inhibidores de corrosión. Esta técnica mide la respuesta del sistema electroquímico cuando se le aplica un pequeño cambio de corriente alterna en un rango amplio de frecuencias [40]. La EIS es capaz de descomponer el comportamiento del sistema en componentes resistivas y capacitivas, lo que permite una comprensión detallada de los mecanismos de corrosión [40].

La impedancia total (9) es la oposición que un sistema pone al paso de corriente eléctrica alterna, un tipo de resistencia que cuenta con dos partes, la parte resistiva y la parte reactiva [40], [41]. La parte resistiva (Z') es la resistencia constante que tiene el sistema al paso de corriente; por otro lado, se tiene la parte reactiva (Z'') que se relaciona al almacenamiento de energía del sistema y el efecto de ciertos fenómenos como la doble capa eléctrica en la superficie y el electrolito [42].

$$Z = Z' + jZ'' \quad (9)$$

Donde:

Z : impedancia total en Ohmios (Ω)

Z' : parte resistiva en números reales en Ohmios (Ω)

Z'' : parte reactiva en números imaginarios en Ohmios (Ω)

j : indicador de que Z'' está relacionada directamente a procesos de almacenamiento de energía

La EIS brinda información del comportamiento del sistema en diferentes escalas de tiempo. Por ejemplo: a frecuencias bajas se pueden identificar efectos relacionados al funcionamiento de inhibidores y al transporte de moléculas; a frecuencias medias es posible encontrar la resistencia del sistema ante la transferencia de carga (R_{ct}), lo cual muestra la facilidad de que ocurra la corrosión en el sistema. Finalmente, a altas frecuencias es posible analizar la resistencia del electrolito (R_s) [41], [42]. A partir de los datos obtenidos del ensayo es posible realizar los diagramas de Nyquist y Bode.

En los diagramas de Nyquist se encuentra la parte resistiva (Z') en el eje x y la parte reactiva (Z'') en el eje y, donde usualmente se forma un semicírculo (**Figura 2**) El diámetro del semicírculo brinda el dato de la resistencia de carga (R_{ct}). El primer punto del semicírculo indica la resistencia del electrolito, donde corta al eje x. Finalmente, el comportamiento al final del semicírculo brinda información respecto al comportamiento ya que si se observa una cola, indica la presencia del efecto de difusión sobre la superficie de la muestra [42].

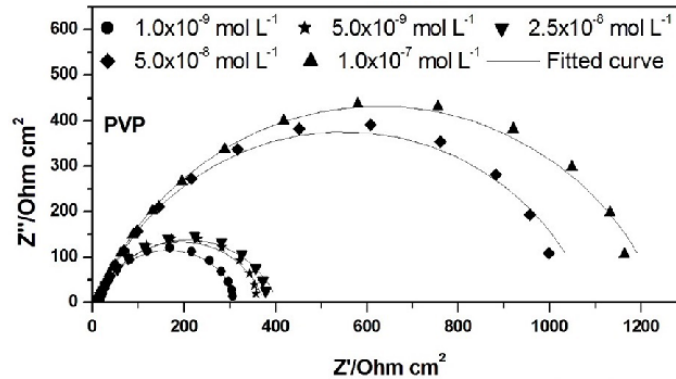


Figura 2. Ejemplo de diagrama Nyquist. Acero al carbono en HCl 0.5M [43]

El diagrama de Bode es una representación gráfica que muestra cómo la impedancia ($|Z|$) y el ángulo de fase (ϕ) cambian en función de la frecuencia (f) de la corriente alterna. Este gráfico ofrece una perspectiva más completa que el diagrama de Nyquist, ya que muestra los fenómenos resistivos, capacitivos o difusionales que predominan en diferentes rangos de frecuencia [42]. Este diagrama consta de dos gráficos: Magnitud de la impedancia ($|Z|$) en el eje y vs la frecuencia (f) en el eje x, en este diagrama se observa la variación de la resistencia del sistema al flujo de corriente según la frecuencia y el diagrama de Ángulo de fase (ϕ) vs frecuencia (f) en escala logarítmica, donde se observa la relación entre los componentes resistivos y reactivos [42].

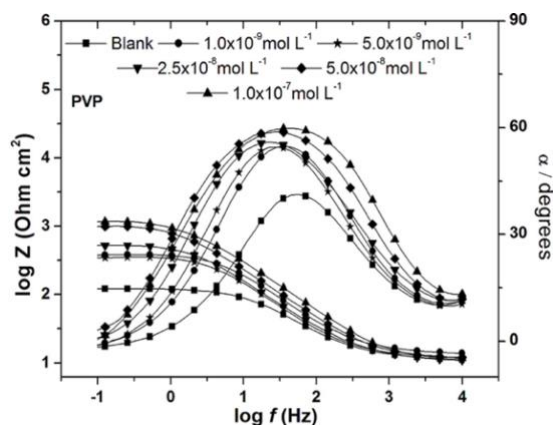


Figura 3. Ejemplo de Diagrama de Bode. Acero al carbono en HCl 0.5M [43]

A partir del diagrama de Bode (**Figura 3**) es posible obtener diferentes datos. Si se analiza la impedancia a frecuencias altas, es posible obtener la resistencia del electrolito (R_s). Se puede conocer la resistencia a la transferencia de carga (R_{ct}) a partir de la diferencia de la impedancia en frecuencias bajas y altas, aplicando la ecuación (10) [42].

$$R_{ct} = |Z|_{baja\ frecuencia} - |Z|_{alta\ frecuencia} \quad (10)$$

A partir de este resultado se puede comprobar el funcionamiento del inhibidor, ya que si se cuenta con un mayor R_{ct} se evidencia la reducción de la actividad electroquímica en la superficie. Adicionalmente, el pico del ángulo de fase indica la región donde hay mayor comportamiento capacitivo. Es posible calcular la capacitancia de la doble capa aplicando (11) [42].

$$C_{dl} = \frac{1}{2\pi f_{max} R_{ct}} \quad (11)$$

Es importante destacar que los resultados obtenidos mediante mediciones de impedancia no solo proporcionan información experimental directa, sino que también pueden ser analizados y simulados utilizando herramientas, como el software ZView, el cual permite ajustar los datos experimentales a modelos equivalentes de circuitos eléctricos, los cuales representan los diferentes procesos electroquímicos que ocurren en la interfase electrodo-electrolito.

A través de la simulación y ajuste de los datos, es posible obtener parámetros clave como la resistencia a la polarización, la resistencia de transferencia de carga, la capacitancia de doble

capa y otros elementos asociados a procesos de difusión. Esta aproximación no es solo de gran ayuda en la interpretación de los resultados experimentales, sino que también ayuda a validar los modelos propuestos, aumentando la confiabilidad y precisión del análisis, facilitando la correlación entre los datos experimentales y los modelos teóricos de impedancia.

3.11.3.3. Curvas de polarización

Las curvas de polarización (**Figura 4**) son una técnica esencial para evaluar la resistencia a la corrosión de materiales metálicos, ya que permiten obtener parámetros clave como el potencial de corrosión (E_{corr}) y la corriente de corrosión (i_{corr}), mediante el análisis como las pendientes de Tafel o métodos diferenciales[44]. Estas curvas revelan las regiones de polarización activa, pasivación y difusión, proporcionando información sobre los mecanismos que rigen el proceso de corrosión. A partir del i_{corr} calculado por extrapolación o métodos diferenciales en casos más complejos, es posible determinar la tasa de corrosión (CR) usando factores como el peso equivalente y la densidad del material. Este enfoque no solo cuantifica la corrosión, sino que también permite comprender la cinética de las reacciones anódicas y catódicas involucradas.[44]

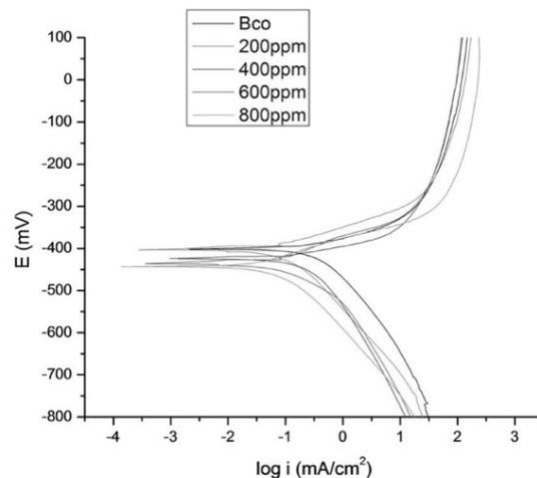


Figura 4. Ejemplo de curvas de polarización, mostrando diferentes concentraciones de inhibidor natural en la corrosión de AISI 1019 en medio ácido [45]

La polarización anódica ocurre cuando el material es forzado a oxidarse mediante el incremento del potencial positivo aplicado. Este proceso representa la disolución del material en el medio corrosivo, ya que la reacción predominante es la pérdida de electrones en el ánodo,

formando especies iónicas, siendo fundamental para comprender la velocidad a la que el metal se disuelve en condiciones específicas y cómo las propiedades del material o los inhibidores influyen en este fenómeno.

La polarización catódica, por otro lado, se centra en la reducción de especies presentes en el sistema, como los protones (H^+) que forman hidrógeno molecular (H_2) en medios ácidos o el oxígeno molecular (O_2) que se reduce en medios neutros. Este proceso es crucial para analizar cómo las reacciones catódicas contribuyen al proceso de corrosión, ya que estas complementan las reacciones anódicas y afectan significativamente el balance electroquímico en el sistema.

Existen diferentes formas de analizar las curvas de polarización potenciodinámica, usualmente estos diagramas presentan en el eje y el potencial aplicado (E) en voltios (V) y el eje x se presenta la densidad de corriente (i) en amperios por centímetro cuadrado ($\frac{A}{cm^2}$) en escala logarítmica [44], [46]. Estas curvas usualmente presentan tres regiones: región de polarización, a bajas densidades de corriente la velocidad es dominada por la transferencia de carga y donde se encuentra la corriente de corrosión. Luego, en materiales como aceros inoxidable se encuentra la región de pasivación, donde se forma una capa protectora para reducir la velocidad de corrosión. Finalmente se encuentra la región de polarización por sobrevoltaje donde a altas densidades de corriente, las reacciones de corrosión alcanzan un límite marcado por la difusión de especies [46].

En el análisis de corrosión mediante curvas de polarización, la densidad de corriente de corrosión (i_{corr}) puede determinarse a partir de la extrapolación de las ramas anódica y catódica según la teoría de Tafel. Esta metodología permite obtener (i_{corr}) sin mediciones directas, lo que es especialmente útil para evaluar la eficiencia de inhibidores de corrosión y el comportamiento electroquímico de los materiales en diferentes medios [46]. Se analiza tanto la región anódica como la catódica, aplicando respectivamente (12) y (13).

$$E = E_{corr} + \frac{a}{\beta_a} \ln(i) \quad \text{para la región anódica} \quad (12)$$

$$E = E_{corr} + \frac{a}{\beta_c} \ln(i) \quad \text{para la región catódica} \quad (13)$$

Donde:

E_{corr} : potencial de corrosión (punto de intersección entre la rama catódica y anódica)

i : densidad de corriente

β_a : pendiente de Tafel anódica

β_c : pendiente de Tafel catódica

Para ello, una vez determinados los interceptos y las pendientes de Tafel, se puede calcular i_{corr} , aplicando la ecuación (14), la cual se basa en la diferencia de los interceptos de ambas ramas y la suma de sus respectivas pendientes, permitiendo estimar con precisión la velocidad de corrosión en función de los parámetros obtenidos experimentalmente [46]

$$i_{corr} = 10^{\frac{o.o \text{ catódico} - o.o \text{ anódico}}{B.anódico + B.catódico}} * F \quad (14)$$

Donde:

i_{corr} : densidad de corriente de corrosión

$o.o \text{ catódico}$: intercepto de la rama catódica

$o.o \text{ anódico}$: intercepto de la rama anódica

$B. \text{catódico}$: pendiente de la rama catódico

$B. \text{anódico}$: pendiente de la rama anódica

F : factor de ajuste de unidades

Otra forma de analizar las curvas de polarización es por medio del método diferencial para i_{corr} , este se aplica en los casos que no es posible extrapolar las pendientes de Tafel correctamente debido a la naturaleza de las curvas experimentales. Este método se basa en analizar cómo cambia el potencial eléctrico respecto a la densidad de corriente (i) en la región cercana al potencial de corrosión (E_{corr}). En lugar de extrapolar líneas rectas, el método diferencial calcula directamente las variaciones de E con respecto a $i \ln(i)$ a partir de los datos experimentales [47]. A partir de estas derivadas, es posible estimar i_{corr} con mayor precisión, utilizando la relación matemática que describe los cambios del sistema electroquímico, aplicando la ecuación (15). En este método se utilizan las pendientes de Tafel, pero definidas en una región más pequeña y cercana a E_{corr} , a diferencia del método de Tafel que se basa en la extrapolación total de las ramas catódica y anódica [44].

$$i_{corr} = \frac{2.303}{\frac{dE}{d\ln(i)}} * \frac{\beta_a * \beta_c}{\beta_a + \beta_c} \quad (15)$$

Donde:

i_{corr} : densidad de corriente

β_a : pendiente de Tafel anódica

β_c : pendiente de Tafel catódica

$\frac{dE}{d\ln(i)}$: derivada calculada a partir de los datos experimentales

2.303: factor de conversión de logaritmo natural (\ln) a logaritmos decimales (\log_{10})

3.11.4. Isotermas de adsorción

La adsorción es un proceso fisicoquímico en el cual las moléculas o iones de una fase fluida se adhieren a la superficie de un sólido [48]. Este fenómeno es fundamental en diversos campos como la catálisis, el tratamiento de aguas y la protección contra la corrosión. Para describir el comportamiento de la adsorción en función de la concentración del adsorbato y la cantidad retenida en la superficie, se emplean modelos matemáticos conocidos como isotermas de adsorción [49].

3.11.4.1. Isoterma de Langmuir

La isoterma de Langmuir asume que la adsorción ocurre en sitios específicos y homogéneos, formando una monocapa de moléculas adsorbidas sin interacciones entre ellas; esta se basa en la ecuación (16) [50], [51]:

$$\frac{C}{\theta} = \frac{1}{K_{ads}} + C \quad (16)$$

Donde:

C es la concentración del adsorbato la fase fluida

θ es el grado de cobertura de la superficie

K_{ads} es la constante de equilibrio de adsorción

3.11.4.2. Isoterma de Freundlich

El modelo de Freundlich describe la adsorción en superficies heterogéneas con interacciones entre las moléculas adsorbidas y asume una adsorción en múltiples capas: esta se basa en la ecuación (17) [51].

$$\log(\theta) = \log(K_F) + n \log(C) \quad (17)$$

Donde:

θ es el grado de cobertura de la superficie

K_F es la constante de Freundlich, indicando la capacidad de adsorción

n es un parámetro empírico relacionado a la intensidad de adsorción

C es la concentración del adsorbato la fase fluida

3.11.4.3. Isoterma de Temkin

La isoterma de Temkin supone que la energía de adsorción de las moléculas disminuye linealmente con la fracción de cobertura, debido a interacciones del adsorbato consigo mismo en la superficie del material. A diferencia del modelo de Langmuir, que asume una adsorción en sitios homogéneos con energía constante, Temkin considera que la presencia de otras moléculas adsorbidas afecta la energía de los nuevos sitios disponibles. Esta isoterma se basa en la ecuación (18) [50], [51].

$$\theta = B \ln C + B \ln K_T \quad (18)$$

$$\text{Siendo } B = \frac{RT}{b}$$

Donde:

K_T es la constante de Temkin

θ es el grado de cobertura de la superficie

b es el coeficiente relacionado con la energía de adsorción

R es la constante de los gases

T es la temperatura en Kelvin

3.11.4.4. Interacciones Competitivas y No Linealidad en la Energía de Adsorción

El proceso de adsorción en superficies metálicas no siempre sigue un comportamiento ideal, lo que se debe a las interacciones entre las moléculas adsorbidas y la superficie pueden generar alteraciones en la relación entre la cantidad adsorbida y la concentración en equilibrio [51], [52]. En muchas isotermas, como Langmuir, Freundlich y Temkin, se hacen suposiciones sobre la homogeneidad de la superficie y la independencia de los sitios de adsorción. Sin embargo, en la realidad, puede verse afectado por interacciones competitivas y cambios en la energía de adsorción[51].

3.11.4.4.1. Interacciones competitivas entre moléculas adsorbidas

Cuando múltiples especies están presentes en la solución, la adsorción puede verse afectada por la competencia entre diferentes moléculas por los sitios disponibles en la superficie [50]. Esto puede provocar que la adsorción de una especie disminuya en presencia de otra, alterando el equilibrio de adsorción y afectando la selectividad del proceso. Este fenómeno es especialmente relevante en sistemas multicomponentes, donde diferentes moléculas pueden tener diferentes afinidades o preferencias en la superficie [51], [52].

3.11.4.4.2. Variabilidad de la energía de adsorción

En algunos modelos (Temkin) se considera que la energía de adsorción disminuye linealmente a medida que la superficie se cubre con moléculas adsorbidas. Esta suposición se basa en la idea de que las interacciones entre las moléculas adsorbidas generan efectos repulsivos o atractivos, modificando la energía de adsorción a medida que aumenta la cobertura superficial [53]. Sin embargo, en ciertos casos, esta variación puede no ser estrictamente lineal, sino depender de la naturaleza de los enlaces formados y de la distribución de los sitios activos en la superficie [52], [53].

Por otro lado, la isoterma de Freundlich plantea un modelo donde la adsorción ocurre en una superficie heterogénea con diferentes energías de adsorción. En este caso, la no linealidad se manifiesta en la relación entre la cantidad adsorbida y la concentración en equilibrio, con una

variación en la intensidad de adsorción dependiendo de la disponibilidad de sitios con energías más altas o bajas.[51], [53]

3.11.4.4.3. Efectos de la no linealidad en inhibidores

La comprensión de las interacciones y la variabilidad de la energía de adsorción es fundamental en aplicaciones como la inhibición de la corrosión mediante adsorción de compuestos en superficies metálicas [52], [53]. Dependiendo de la naturaleza del inhibidor y del medio en el que se encuentra, la adsorción puede verse afectada por interacciones cooperativas (que favorecen la adsorción de más moléculas) o competitivas (que la reducen) [52]. Esto implica que la selección de inhibidores debe considerar no solo la afinidad con la superficie, sino también cómo la cobertura superficial afecta la efectividad del compuesto [51], [52].

3.11.5. Caracterización de materiales

La caracterización de materiales es un conjunto de técnicas y métodos que permiten analizar y comprender las propiedades físicas, químicas y mecánicas de un material, las cuales determinan su comportamiento. De esta forma, es posible conocer la composición química de un material, su resistencia a la corrosión, su conductividad eléctrica, su respuesta a cargas mecánicas y térmicas, entre otras muchas características [54].

3.11.5.1. Metalografía

Esta es una técnica que se utiliza para estudiar la estructura interna de los metales y aleaciones. Consiste en observar, analizar y caracterizar la microestructura de estos materiales para relacionarla con sus propiedades físicas, químicas y mecánicas. Utilizando esta técnica es posible verificar la calidad de los materiales y detectar defectos en su estructura cristalina [55]. Para la preparación de muestras se debe seguir la norma ASTM E3 – 11 (2017) y para el micro-ataque de metales y aleaciones se recomienda seguir la norma ASTM 407-99, seleccionando el ataque para el material que se analiza. A partir de las metalografías se puede obtener información como fases presentes, tamaño de grano, forma y orientación de los granos, la presencia de inclusiones y defectos presentes en la muestra [56].

3.11.5.2. Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

La microscopia electrónica de barrido (SEM) es una técnica de microscopía que utiliza un haz de electrones para obtener imágenes de una muestra[54]. A diferencia de los microscopios ópticos, el SEM permite alcanzar mayor resolución, lo que proporciona la posibilidad de observar detalles a escala nanométrica. Utilizando esta técnica es posible medir con precisión el tamaño y la forma de partículas individuales, ya sean metálicas, cerámicas, poliméricas o biológicas; adicionalmente, se puede visualizar la distribución espacial de diferentes fases en un material, como en aleaciones o materiales compuestos[54].

3.11.5.3. Perfilometría

La perfilometría es una técnica de medición que se utiliza para caracterizar la topografía de una superficie, brinda información como la rugosidad del material, midiendo las pequeñas irregularidades presentes en una superficie [57]. La perfilometría nos permite obtener un perfil transversal de la superficie, lo que es útil para medir la profundidad de los surcos, la altura de las crestas y otras características geométricas [57]. A partir de este ensayo se obtienen diferentes parámetros que caracterizan la como por ejemplo, la rugosidad aritmética, la cual se refiere a la media de las desviaciones en la superficie del material

3.11.5.4. Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)

Es una técnica que utiliza la radiación infrarroja para identificar sustancias y estudiar sus propiedades moleculares, cada sustancia tiene un espectro infrarrojo único; por medio de esta técnica es posible identificar compuestos, obtener información estructural, conocer la pureza de la muestra y cuantificar la cantidad o concentración de una sustancia en la muestra estudiada[58].

4. Materiales y métodos

4.1. Metodología para el cumplimiento de objetivos

Los objetivos han sido definidos con el fin de analizar el comportamiento del inhibidor realizado con extracto de *Justicia Tinctoria* y *Ganoderma Lucidum* en superficies metálicas de aceros de bajo carbono, expuestas a soluciones ácidas y neutras; esto para evaluar su capacidad inhibidora de corrosión. A continuación, se detalla la metodología para los objetivos:

Objetivo Específico 1:

Determinar la eficiencia de inhibición de los extractos naturales de *Justicia Tinctoria* (“Azul de Mata”) y *Ganoderma Lucidum* (“Hongo Ganoderma”) en medios ácido y neutro, bajo distintas concentraciones y temperaturas, mediante ensayos gravimétricos, siguiendo las normas ASTM G1 y ASTM G31.

Se prepararon soluciones de los extractos naturales a diferentes concentraciones y se disolvieron en medios de ensayo específicos: HCl 1M (medio ácido) y NaCl 0.6M (medio neutro). Se utilizaron probetas de acero de bajo carbono debidamente pulidas y pesadas antes de la inmersión. Estas probetas se sumergieron en los medios corrosivos a temperaturas controladas durante tiempos establecidos, según las normas ASTM G1 y ASTM G31. Posteriormente, se extrajeron, se limpiaron de acuerdo con los procedimientos normativos y se pesaron nuevamente para determinar la pérdida de masa. Con estos datos, se calculó la tasa de corrosión y la eficiencia de inhibición, comparando los resultados con muestras sin inhibidor.

Objetivo Específico 2:

Evaluar la eficiencia de los extractos de *Justicia Tinctoria* (“Azul de Mata”) y *Ganoderma Lucidum* (“Hongo Ganoderma”) como inhibidores de corrosión mediante pruebas electroquímicas en medios ácido y neutro, de acuerdo con las normas ASTM G3 y ASTM G102.

Se emplearon técnicas electroquímicas como curvas de polarización potenciodinámica y Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS), utilizando un sistema de celda electroquímica de tres electrodos con un electrodo de referencia de Ag/AgCl, un contraelectrodo de platino y como electrodo de trabajo una muestra de acero de bajo carbono. Se registraron los

valores de potencial de corrosión y densidad de corriente de corrosión en presencia y ausencia de los extractos a distintas concentraciones y temperaturas. La eficiencia de inhibición se calculó mediante la reducción de i_{corr} según la norma ASTM G102, comparando los valores en diferentes condiciones experimentales.

Objetivo Específico 3:

Identificar la concentración óptima de los extractos de *Justicia Tinctoria* (“Azul de Mata”) y *Ganoderma Lucidum* (“Hongo Ganoderma”) que presenten la mayor eficiencia inhibidora en medios ácido y neutro

A partir de los resultados obtenidos en los ensayos gravimétricos y electroquímicos, se evaluó la eficiencia de inhibición a distintas concentraciones de los extractos en los dos medios de estudio. Se aplicó un análisis comparativo para determinar la concentración a la cual los extractos logran la mayor reducción de la velocidad de corrosión sin afectar la estabilidad del sistema. Se buscó una concentración óptima en función de la máxima eficiencia inhibidora y la cantidad de extracto, evitando efectos adversos como precipitación o saturación del extracto.

Objetivo Específico 4:

Aplicar técnicas de caracterización para analizar la composición de los extractos utilizados y la morfología de la superficie de las muestras de acero de bajo carbono, empleando Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) y Microscopía Óptica.

Se analizaron los extractos naturales mediante FTIR para identificar los grupos funcionales responsables de la inhibición de la corrosión. Para evaluar la interacción de los extractos con la superficie metálica, se empleó SEM antes y después de la exposición a los medios corrosivos, permitiendo visualizar la morfología, formación de capas protectoras y presencia de productos de corrosión. Además, se complementó con microscopía óptica para observar cambios en la rugosidad superficial y distribución de los compuestos sobre la superficie metálica.

4.2. Preparación de disoluciones

4.2.1. Ácido clorhídrico 1M (HCl 1M)

Para preparar 1 litro de solución de ácido clorhídrico 1 molar (HCl 1M), se utilizó ácido clorhídrico concentrado al 37% con una densidad de 1.19 g/cm^3 . En primer lugar, se vertieron 100 mL de agua destilada en un balón aforado de 1 litro. Posteriormente, utilizando una probeta graduada, se midieron 83 mL de HCl concentrado, los cuales fueron añadidos cuidadosamente al balón que contenía el agua destilada. Finalmente, se completó el volumen del balón aforado hasta la marca con agua destilada y se agitó la solución para asegurar una mezcla homogénea.

4.2.2. Cloruro de sodio 0.6 M (NaCl 0.6M)

Para preparar 1 litro de solución de cloruro de sodio 0.6 molar (NaCl 0.6M), se pesaron 35.064 g de NaCl utilizando una balanza analítica. Inicialmente, se añadieron aproximadamente 300 mL de agua destilada a un beaker. Posteriormente, el NaCl previamente pesado se transfirió al beaker, asegurándose de que todo el sólido estuviera en contacto con el agua. Se agitó la mezcla para facilitar la disolución del NaCl. Seguidamente, se trasvasó el contenido del beaker a un balón aforado de 1L. Finalmente, se completó el volumen del balón aforado hasta la marca con agua destilada, y la solución se agitó nuevamente para garantizar una mezcla homogénea.

4.2.3. Disoluciones con los extractos

Para la preparación de una solución de HCl 1M o NaCl 0.6M con extracto a una concentración de 1000 ppm, se midió en una balanza analítica (*Figura 5*) la cantidad necesaria de extracto seco. Para obtener 1 litro de disolución, se pesó 1 gramo de extracto. Este se colocó en un beaker, al cual se añadieron 20 gotas de etanol con el objetivo de facilitar su disolución. El beaker se colocó en un baño ultrasónico durante aproximadamente 15 minutos para favorecer la homogenización. Seguidamente, se agregaron 200 mL de la solución previamente preparada (HCl 1M o NaCl 0.6M), y el beaker se volvió a colocar en el baño ultrasónico.



Figura 5. Medición de masa del extracto para las disoluciones.

Fuente: [Elaboración propia]

En caso de que el extracto no se disolviera completamente, se añadieron 2 gotas adicionales de etanol, repitiendo el proceso en el baño ultrasónico. Este procedimiento se reiteró hasta que la disolución fuera lo más homogénea posible, siempre asegurándose de que el volumen total de etanol en la disolución no excediera el 1% del volumen final. Una vez lograda una disolución homogénea, el contenido del beaker se transfirió a un balón aforado y se ajustó el volumen con la solución previamente preparada (HCl 1M o NaCl 0.6M). La mezcla se dejó reposar durante 20 minutos, y en caso de observarse sedimentos, se procedió a filtrar la solución.

Para el proceso de filtración, se midió previamente la masa del papel de filtro en una balanza analítica. Posteriormente, se utilizó un embudo para filtrar la disolución de manera controlada. Al finalizar, el papel de filtro se dejó secar y se pesó nuevamente para calcular la cantidad de extracto retenido y así aproximar la cantidad de extracto presente en la disolución.

4.3. Preparación de muestras

Para las pruebas gravimétricas, se utilizaron prismas de acero de bajo contenido de carbono con dimensiones de 6.5 mm x 6.55 mm x 9.5 mm, su composición se puede observar en la **Tabla 2**. Estos prismas fueron recibidos ya cortados y sometidos a un proceso de lijado para garantizar una superficie uniforme y adecuada para los ensayos. El lijado se realizó utilizando lijas de grano

progresivo hasta alcanzar un acabado final con lija de grano 1200. Una vez finalizado el proceso de lijado, los prismas se enjuagaron cuidadosamente con agua destilada para eliminar residuos generados durante el lijado. Posteriormente, se aplicó etanol al 99% para asegurar una limpieza más efectiva y facilitar el secado, que se realizó empleando aire comprimido, garantizando superficies limpias y libres de contaminantes.

Tabla 2. Composición de los prismas de acero de bajo carbono utilizado para ensayos gravimétricos.

Elemento		Contenido	
		(%)	±
Hierro	Fe	99.15	0.212
Carbono	C	0.09	0.033
Manganeso	Mn	0.17	0.069
Silicio	Si	0.04	0.013
Cromo	Cr	0.01	0.010
Níquel	Ni	0.02	0.013
Fósforo	P	0.03	0.006
Azufre	S	0.04	0.013
Titanio	Ti	0.02	0.006

Fuente: [Elaboración propia]

Para los análisis electroquímicos, se emplearon láminas de acero de bajo contenido de carbono con 1 mm de espesor, seleccionadas con el objetivo de minimizar el desperdicio de material, su composición se pudo observar en la **Tabla 3**. Estas láminas también fueron sometidas a un proceso de lijado (**Figura 6**) secuencial utilizando lijas de grano 220, 320, 600 y, finalmente, 1200. Durante el proceso de preparación, se utilizó agua destilada entre cambios de lija para eliminar partículas residuales. Una vez completado el lijado, las láminas fueron enjuagadas nuevamente con agua destilada, seguidas por la aplicación de etanol al 99% para mejorar la limpieza. Finalmente, se secaron utilizando aire comprimido, asegurando que las superficies estuvieran homogéneas, limpias y listas para los ensayos electroquímicos.

Tabla 3. Composición de las láminas de acero de bajo carbono utilizado para ensayos electroquímicos.

Elemento		Contenido	
		%	±
Hierro	Fe	99.45	0.058
Carbono	C	0.06	0.009
Manganeso	Mn	0.16	0.003
Silicio	Si	0.06	0.007
Cromo	Cr	0.04	0.006
Níquel	Ni	0.02	0.002
Fósforo	P	0.01	0.003
Azufre	S	0.01	0.002
Titanio	Ti	0.01	0.006

Fuente: [Elaboración propia]

Este procedimiento estandarizado permitió obtener muestras con condiciones superficiales óptimas, minimizando la influencia de contaminantes externos y garantizando la reproducibilidad y precisión de los resultados obtenidos en ambos ensayos.

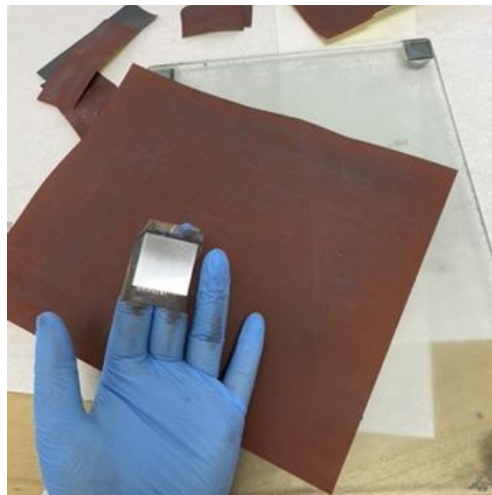


Figura 6. Lijado de láminas de acero.

Fuente: [Elaboración propia]

4.3.1. Electrodo de trabajo para pruebas electroquímicas

Fue necesario generar un contacto eléctrico en cada lámina para las pruebas electroquímicas (*Figura 7*). Para esto se fijó un cable de cobre (*Figura 7 (a)*) de 10 cm de largo en la parte posterior para establecer el contacto, asegurado a la parte posterior de la placa usando cinta conductora ((*Figura 7 (b)*) para garantizar la conexión.

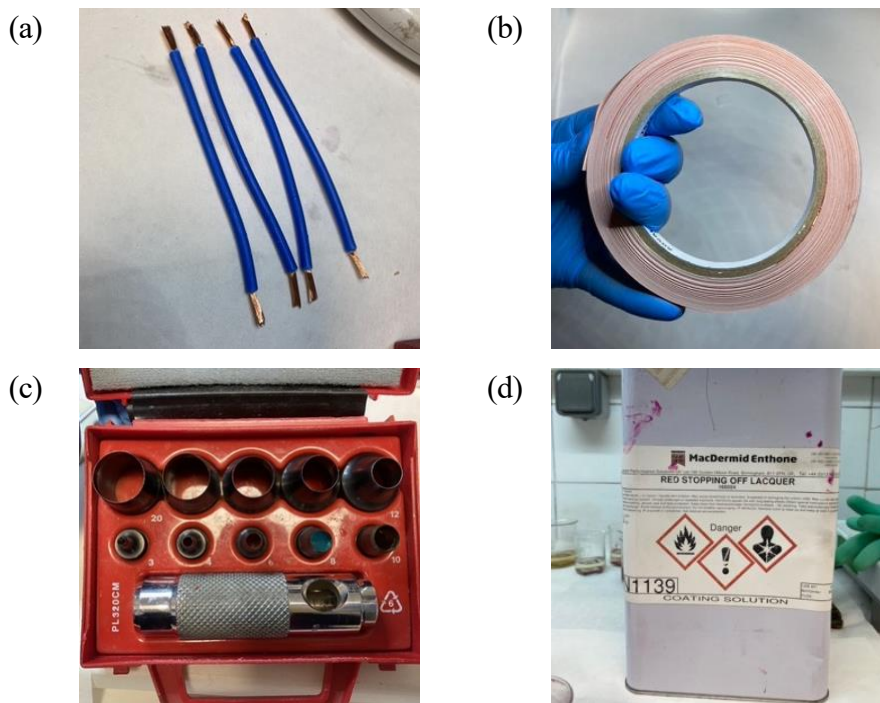


Figura 7. Materiales mencionados en el montaje de muestras: (a) cables de cobre, (b) cinta de cobre, (c) sacabocados, (d) laca. Fuente: [Elaboración propia]

Para delimitar el área de análisis, se utilizó un sacabocados ((*Figura 7 (c)*) con área de 1.09 cm². Esto se realizó aplicando cinta impermeable y recubriendo dicha área con laca No45 “Stopping Off Lacquer” de la marca “McDermid Enthone” (*Figura 7 (d)*), con el propósito de evitar resquicios y variaciones en la región de análisis. Sin embargo, durante los ensayos, se observó que la cinta impermeable se levantaba, lo que comprometía los resultados. Para reforzar, se decidió añadir adhesivo epoxi (de la marca Araldite) alrededor del área de análisis definida, generando un sellado más estable y duradero, esto generó variaciones en el área de análisis. Por esta razón, una vez seco el epoxi, se midió el área (*Figura 8 (a)*) utilizando un microscopio graduado (*Figura 8 (b)*) para garantizar exactitud en los ensayos. Estas muestras fueron almacenadas en un desecador.

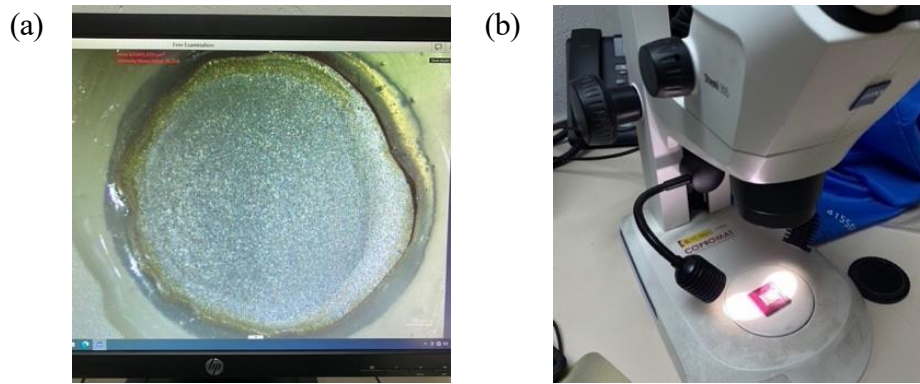


Figura 8. Medición del área de análisis con el microscopio: a) toma de medida. b) equipo. Fuente: [Elaboración propia]

En la **Figura 9** se muestra el montaje de las muestras, incluyendo el contacto eléctrico, la delimitación del área con cinta y laca, y el refuerzo adicional con epoxi.

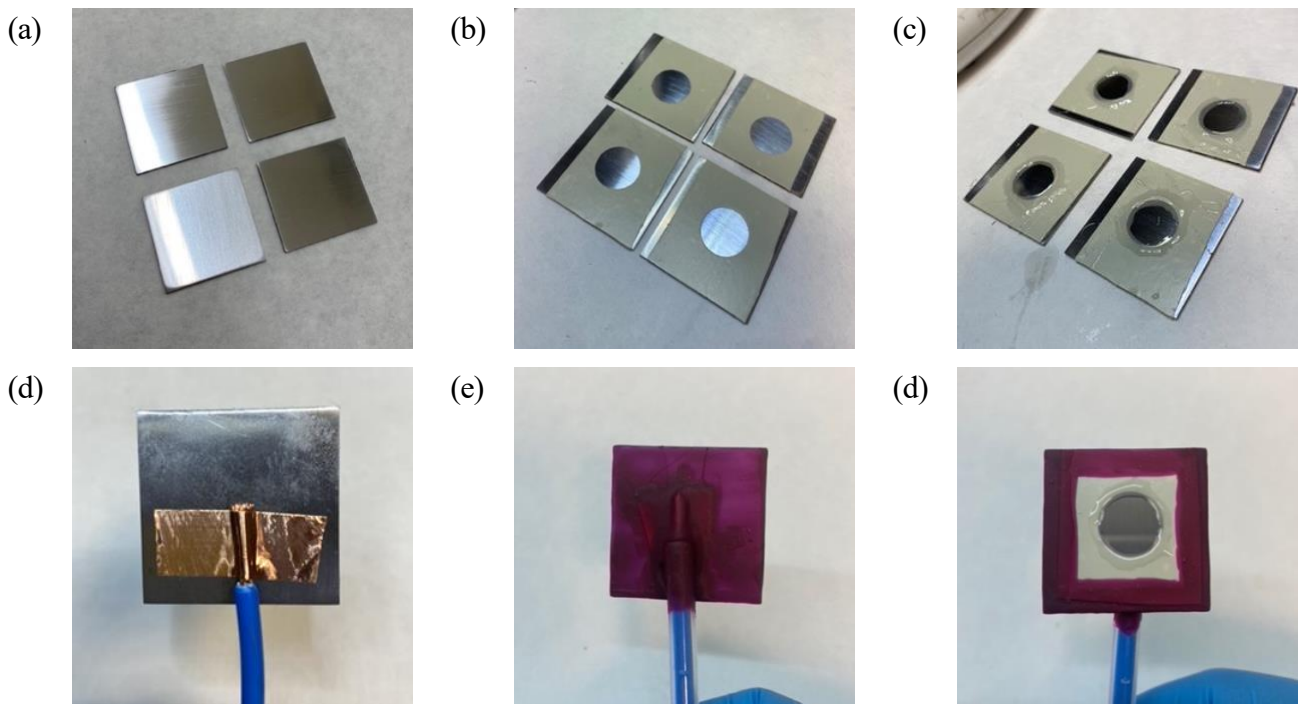


Figura 9. Proceso de montaje de muestras: a) lijado, b) delimitado de área, c) sellado con epoxi marca Araldite, d) contacto con cable y cinta de cobre, e) sellado con laca sobre el contacto, f) sellado con laca del resto de la placa y cinta impermeable. Fuente: [Elaboración propia]

4.4. Análisis gravimétrico

Las muestras metálicas preparadas anteriormente se almacenan en un desecador con aceite para prevenir oxidación y contaminación. Antes de los ensayos gravimétricos, se someten a un procedimiento de limpieza para garantizar una superficie libre de contaminantes.

El proceso comienza con una inmersión en solución de jabón desengrasante, con el fin de eliminar el aceite en el que se almacena. Se continúa con la limpieza con una disolución de agua destilada y jabón sin sulfatos (relación 2:1). Luego, se realiza un enjuague con agua destilada antes de someter las muestras a un decapado químico (detallado en el Apéndice 1) para eliminar óxidos e impurezas. Finalmente, se enjuagan con agua destilada y se limpian con etanol y acetona para asegurar la eliminación de residuos orgánicos. Cada etapa se realiza con inmersiones de siete segundos, girando la muestra para una limpieza uniforme antes de pasar al siguiente paso. El procedimiento completo se ilustra en la **Figura 10**. Una vez finalizado el procedimiento de limpieza las muestras se secaron utilizando aire comprimido, asegurando que las superficies estuvieran homogéneas, limpias y listas para los ensayos gravimétricos.



Figura 10. Procedimiento de limpieza de muestras antes del ensayo gravimétrico.

Fuente: [Elaboración propia]

Utilizando guantes de látex para evitar la contaminación de las muestras, se midieron las aristas de los prismas (ver **Figura 11**) con un vernier digital de la marca Mitutoyo. Posteriormente, se determinó la masa inicial de cada prisma empleando una balanza analítica, registrando el valor

con seis cifras significativas. Esta información fue documentada individualmente para cada muestra.

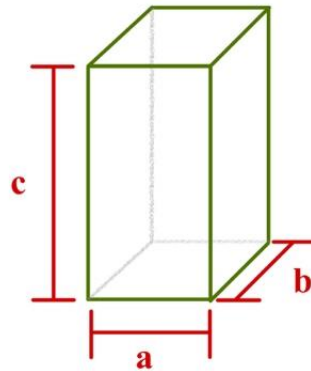


Figura 11. Identificación de las medidas tomadas de las dimensiones de los prismas.

Fuente: [Elaboración propia]

4.4.1. Inmersión de las muestras en las disoluciones

Una vez que las muestras fueron limpiadas, pesadas y medidas, se expusieron a las siguientes soluciones: HCl 1M (blanco), HCl 1M con 1000 ppm de extracto de *Ganoderma Lucidum*, NaCl 0.6M y NaCl 0.6M con 1000 ppm de extracto de *Ganoderma Lucidum*. El proceso de inmersión se realizó colocando las muestras en tubos de centrifugado durante un periodo de dos horas como se muestra en la **Figura 12**.

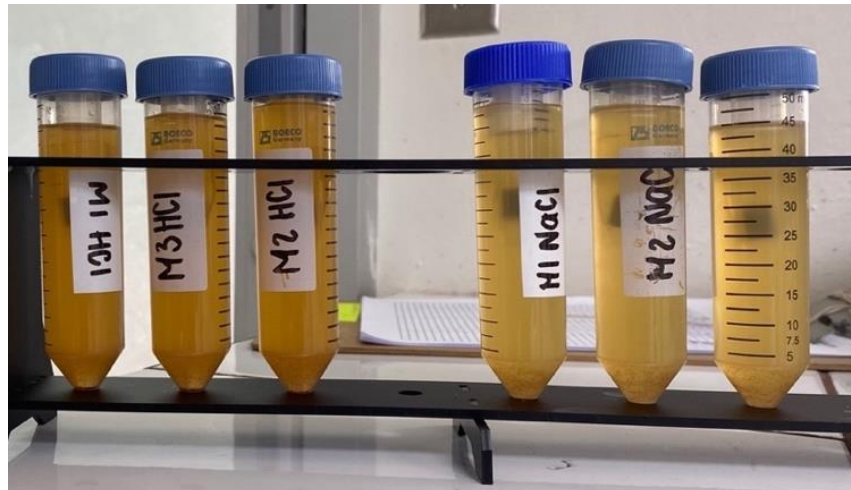


Figura 12. Muestras en inmersión en las disoluciones con 1000 ppm de extracto.

Fuente: [Elaboración propia]

El montaje para las inmersiones se diseñó utilizando un tubo de centrifugado como recipiente principal. En la parte interior de la tapa de este tubo, se fijó con pegamento instantáneo marca “superbonder” un segundo tubo de centrifugado de menor tamaño, previamente modificado. Este tubo más pequeño fue cortado con una cortadora láser para adaptarlo de manera que pudiera sujetar la muestra de forma precisa, asegurando un contacto mínimo con las caras del prisma. Este diseño permitió una inmersión uniforme de las muestras en la solución, reduciendo al máximo las interferencias causadas por el montaje y asegurando la homogeneidad en la exposición a las soluciones de prueba (ver *Figura 13*).

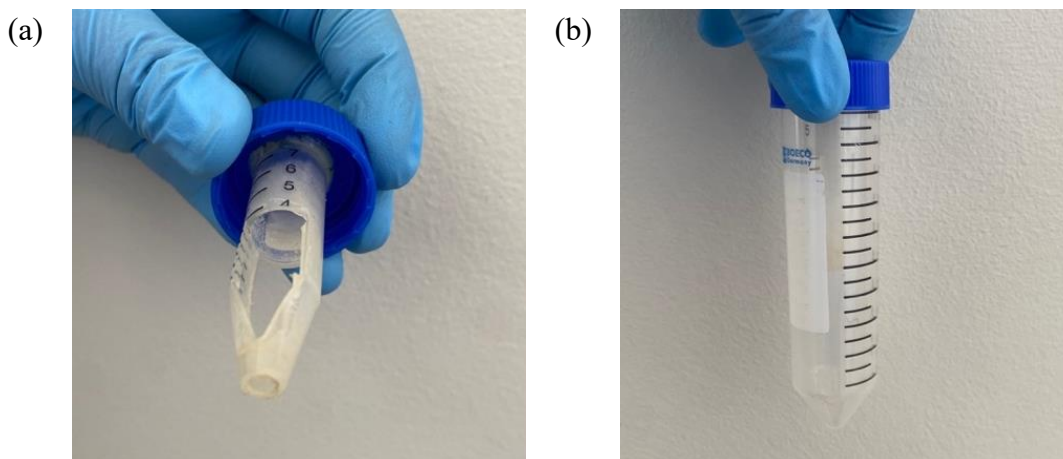


Figura 13. Montaje de muestras para inmersiones: (a) sujeción de la muestra, (b) montaje total.

Fuente: [Elaboración propia]

Una vez finalizado el tiempo de inmersión, los prismas fueron retirados cuidadosamente de los tubos de centrifugado utilizando pinzas para evitar cualquier contaminación. A continuación, se sometieron a un proceso de limpieza diseñado para eliminar residuos que pudieran haberse adherido a la superficie durante la exposición a las soluciones.

El procedimiento comenzó con un enjuague inicial con agua destilada para remover residuos superficiales. Seguidamente, las muestras se sometieron a un decapado químico (detallado en el *Apéndice 1*), cuyo objetivo fue eliminar cualquier óxido o impureza presente en la superficie metálica. Tras este paso, las muestras fueron nuevamente enjuagadas con agua destilada y posteriormente, limpiadas con etanol y acetona para asegurar la completa eliminación de residuos orgánicos. Cada etapa de la limpieza se realizó mediante inmersiones de siete segundos, girando las muestras después de cada inmersión para garantizar que toda la superficie

fuese tratada de manera uniforme. El procedimiento completo está ilustrado en la **Figura 14**. Por último, las muestras limpias se secaron cuidadosamente utilizando aire comprimido, asegurando que estuvieran completamente libres de humedad antes de proceder con los análisis correspondientes.



Figura 14. Diagrama de limpieza final de los ensayos gravimétricos.

Fuente: [Elaboración propia]

Una vez que las muestras estuvieron limpias y secas, se procedió a medir la masa final de los prismas utilizando la misma balanza analítica mencionada anteriormente, con una precisión de seis cifras significativas. Este paso se realizó con el objetivo de calcular la pérdida de masa ocasionada por el proceso de corrosión inducido durante las inmersiones, con este dato se aplicaron las ecuaciones (7) y (8) con el fin de obtener la velocidad de corrosión y el porcentaje de inhibición en cada uno de los casos.

4.5. Análisis electroquímico

Las pruebas se llevaron a cabo montando una celda electroquímica de tres electrodos. Las muestras preparadas anteriormente con el montaje de contacto eléctrico se utilizan como electrodo de trabajo. Se utiliza un electrodo de plata/cloruro de plata (Ag/AgCl) con KCl 3 M como electrodo de referencia. Como contra electrodo en el sistema se utiliza un electrodo de platino. Para realizar las pruebas se llenó la celda con 100 mL de electrolito, la cual correspondía las disoluciones de HCl 1M como referencia del medio ácido, HCl 1M con 1000 ppm de extracto de *Ganoderma Lucidum*, NaCl 0.6M como referencia del medio neutro y NaCl 0.6M con 1000 ppm de extracto de *Ganoderma Lucidum*.

La celda montada anteriormente fue conectada a un potenciostato de la marca Autolab (**Figura. 15(a)**). Para garantizar la precisión de las mediciones y minimizar el ruido en los resultados de las pruebas electroquímicas, se estableció la conexión a tierra del cable del potenciostato a través de una caja de Faraday. Este sistema de blindaje permitió aislar la celda (**Figura. 15(b)**) de interferencias electromagnéticas externas, asegurando así la calidad y confiabilidad de los datos obtenidos.

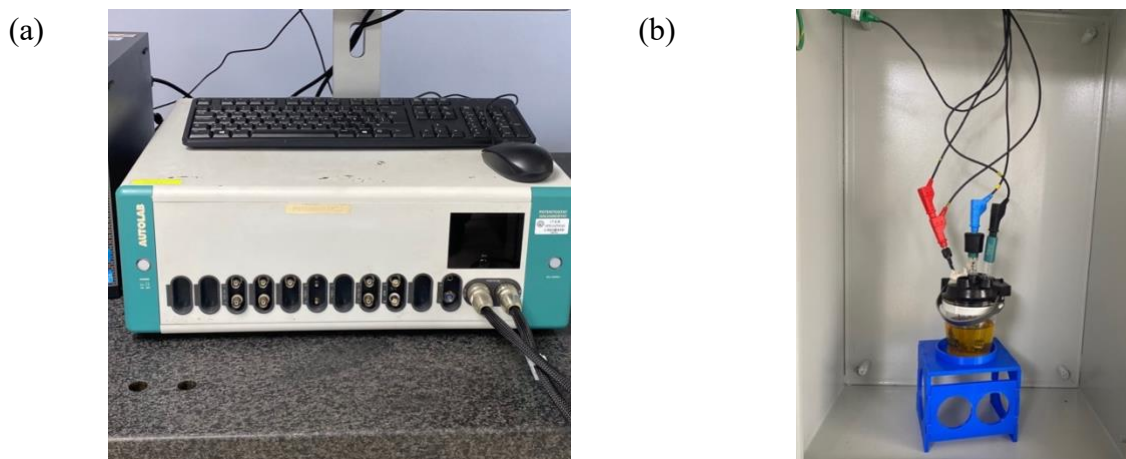


Figura. 15. Equipo para las pruebas electroquímicas: (a) potenciostato Autolab, (b) celda montada dentro de la caja de Faraday. Fuente: [Elaboración propia]

La celda se llena con la solución de trabajo, que puede ser HCl 1M (medio ácido) o NaCl 0.6M (medio neutro), y se deja estabilizar. Se inició con la medición del Potencial de Circuito Abierto (OCP) durante 3600 segundos, con un intervalo de 0.1 segundos, sin aplicar corriente externa. Esta medición fue crucial para determinar el potencial electroquímico estable del sistema antes de aplicar cualquier polarización.

Una vez registrado el OCP, se realizó la espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) con el fin de evaluar la resistencia a la corrosión y los procesos interfaciales en la muestra. Se aplicó una señal de voltaje alterno con una amplitud de 0.00701 V RMS y una onda senoidal (*sine wave*). El barrido de frecuencia se llevó a cabo desde 100 kHz ($1E + 05$ Hz) hasta 0.01 Hz, adquiriendo 10 puntos por década en escala logarítmica. Durante esta medición, se registró la respuesta del sistema en función de la frecuencia, permitiendo determinar parámetros como la resistencia de polarización (R_p), la resistencia de transferencia de carga (R_{CT}) y la capacitancia de doble capa (C_{dl}). Los datos obtenidos se presentan en diagramas de Nyquist y Bode, y

posteriormente se ajustan a modelos equivalentes de circuitos eléctricos para interpretar los mecanismos electroquímicos dominantes.

Después de la medición de impedancia, se continuó con la prueba de polarización lineal (LSV - Linear Sweep Voltammetry) para evaluar la cinética de las reacciones de corrosión. El barrido de potencial se estableció desde $-0.25 V_{OCP}$ hasta $+0.25 V_{OCP}$ con una velocidad de barrido (*scan rate*) de $0.00016 V/s$ y un paso de $0.00122 V$. Durante esta medición, se registró la corriente en función del potencial aplicado. Los datos obtenidos se analizaron mediante extrapolación de Tafel, lo que permitió determinar la densidad de corriente de corrosión y el potencial de corrosión. Además, se calculó la tasa de corrosión y la eficiencia de inhibición, comparando los valores de i_{corr} en presencia y ausencia del inhibidor natural.

4.6. Pruebas de caracterización

4.6.1. Espectroscopía de emisión óptica (EOS)

Para realizar este análisis se utilizaron las muestras preparadas anteriormente, tanto los prismas como las láminas de acero, con el fin de comparar sus composiciones. Estas se limpiaron con agua destilada y etanol previo al análisis. El equipo utilizado fue el espectrómetro del CIEMTEC de la escuela de Ciencia e ingeniería de los materiales del ITCR, marca LECO, modelo GDS500A (**Figura 16**). Previo al análisis se realizó la calibración del equipo con el fin de obtener resultados más confiables. Una vez calibrado, se colocó la muestra en la cámara de análisis y se corrió la prueba.



Figura 16. Espectrómetro de emisión óptica en el CIEMTEC. Fuente: [Elaboración propia]

4.6.2. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Para realizar este análisis se utilizaron dos de las mismas láminas de acero de bajo carbono preparadas para los análisis electroquímicos. Estas se colocaron en beaker diferenciados (**Figura. 17**), uno con la disolución de HCl 1M con 1000 ppm de *Ganoderma Lucidum* y el otro solamente con HCl 1M. Las muestras se tuvieron en inmersión por cuatro días, esto con el fin de poder observar el ataque en las muestras. Una vez cumplidos los 4 días, se limpiaron con agua destilada y etanol.

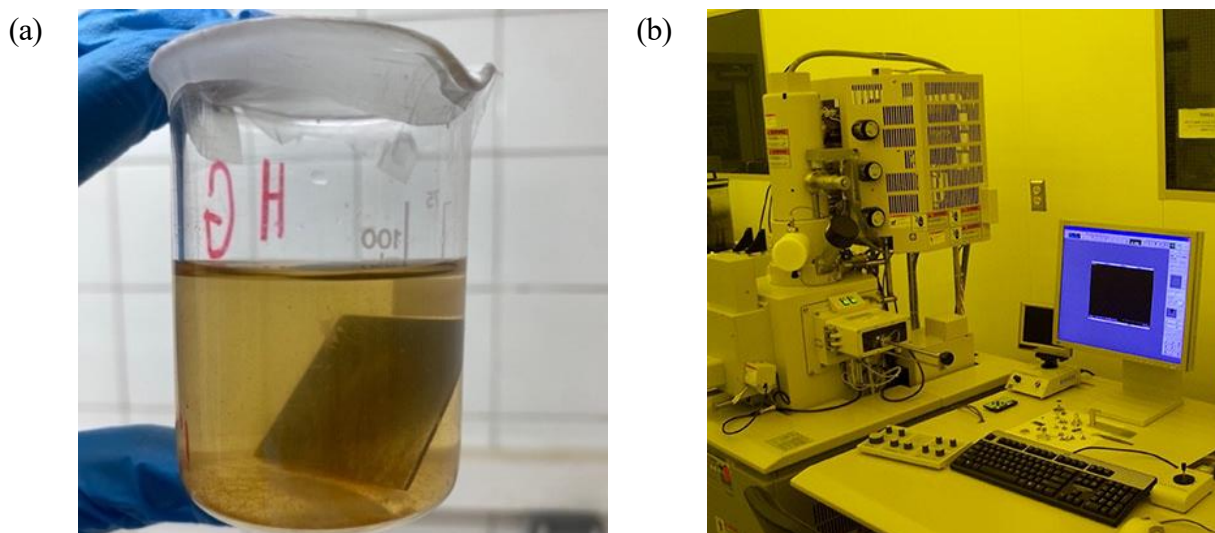


Figura. 17. Materiales para las imágenes de SEM: (a) muestras inmersas utilizadas, (b) Hitachi S-4800 Microscopio electrónico de barrido. Fuentes: [Elaboración propia][59]

Una vez limpias las muestras se llevaron al SEM del CENIM - CSIC, donde se colocaron en el porta muestras y se introdujeron al equipo. El equipo utilizado para este análisis fue el SEM Hitachi S-4800 (**Figura. 17 (b)**) operado a un voltaje de aceleración de 15 kV y con aumentos iniciales de 200x, 500x, 1000x, 2000x y 5000x. En caso de observar discontinuidades o cambios significativos en la superficie del material, se continuó incrementando gradualmente las magnificaciones con el fin de profundizar en los detalles.

4.6.3. Medición de rugosidad superficial

Para realizar este análisis se utilizó el “surface roughness tester”, modelo TR200, marca TIME (**Figura 18 (b)**) del CENIM-CSIC. Las muestras medidas fueron las utilizadas en ensayos electroquímicos, con el fin de analizar el cambio en la topografía de su superficie, provocado por

la corrosión. Como las muestras utilizadas en los ensayos electroquímicos tenían su área de análisis definida y el resto de la placa protegida, luego del ensayo electroquímico, se le retiró la capa de laca y cinta impermeable, para poder medir tanto el área atacada como la zona protegida de la muestra, tal como se muestra en la **Figura 18 (a)**.

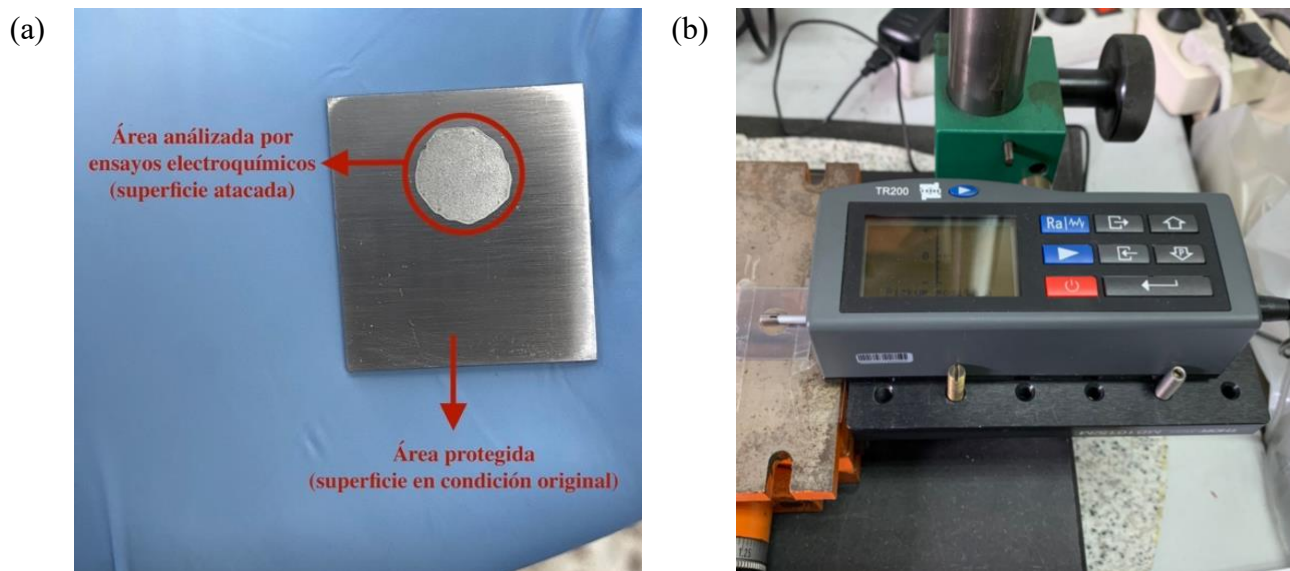


Figura 18. Procedimiento de medición de rugosidad: (a) identificación del área analizadas, (b) perfilómetro TIME TR200.

Fuente: [Elaboración propia]

4.6.4. Infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR)

Para caracterizar los compuestos presentes en el extracto y en las disoluciones, se analizó por medio de Infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR). El equipo utilizado para este análisis fue el “FT-IR/FT-NIR Sepctrometer” marca PerkinElmer precisely, modelo Spectrum 400 del Centro de Investigación de Biología (CIB) en el CSIC (**Figura 19**).

Para este análisis se envió dos tipos de muestra, el extracto puro del *Ganoderma Lucidum* y una disolución de HCl 1M con extracto. Previo a ser enviadas al CIB, la disolución se neutralizó para evitar dañar el equipo. Una vez que el CIB lo recibió, las muestras pasaron por un proceso de liofilización con el fin de eliminar agua y liquido en las muestras, preservando la estructura,

composición química y la estabilidad del material, ya que este proceso minimiza la degradación de sustancias sensibles al calor.



Figura 19. FTIR Spectrum 400, marca PerkinElmer precisely.

Fuente: [Elaboración propia]

5. DESARROLLO Y RESULTADOS

5.1. Solubilidad del extracto en los medios

Al preparar las disoluciones con el extracto de *Justicia Tinctoria* en los medios seleccionados, HCl 1M como medio ácido agresivo y NaCl 0.6 M como medio neutro simulando el agua de mar, se observó que este extracto es prácticamente insoluble en ambas disoluciones. Desde el momento de su preparación, las disoluciones presentaban una mezcla heterogénea, donde se observaba la presencia de grandes partículas sólidas que no lograban disolverse ni dispersarse de manera uniforme en los medios. Este comportamiento limitaba su uso en las pruebas de inhibición de corrosión, ya que no se obtenía una solución homogénea que garantizara la reproducibilidad de los ensayos. En la **Figura 20**, se documenta el aspecto visual de las disoluciones, evidenciando la presencia del precipitado.

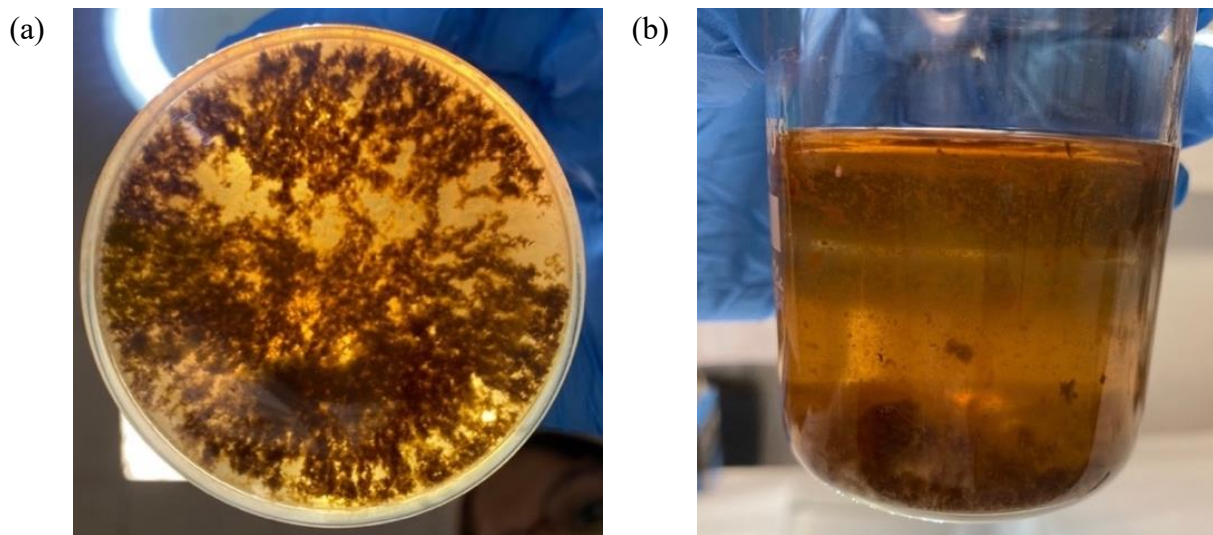


Figura 20. Resultados de intento de disolución del extracto de Justicia Tinctoria: (a) disolución en HCl 1M, (b) disolución en NaCl 0.6 M. Fuente: [Elaboración propia]

Con el objetivo de mejorar la solubilidad del extracto, se intentó reducir su concentración de 1000 ppm a 500 ppm y 100 ppm. Sin embargo, no se logró el resultado esperado, ya que continuaba sin disolverse incluso a concentraciones más bajas. Adicionalmente, se realizó un intento de purificación mediante filtración, buscando remover las partículas no disueltas para obtener una solución clara y uniforme. Este proceso eliminó las partículas presentes en la disolución, sin embargo, la mayoría de la masa inicial del extracto quedó retenida en el filtro,

dejando una solución final con concentraciones insuficientes de extracto y difíciles de cuantificar para las pruebas experimentales. Finalmente, se descartó el uso del extracto de *Justicia Tinctoria* ya que la solubilidad no permite una repetibilidad confiable de los ensayos.

Por otro lado, el extracto de *Ganoderma Lucidum*, inicialmente no presentó problemas de solubilidad. En ambos medios seleccionados (HCl 1M y NaCl 0.6 M), el extracto se disolvió sin mayores dificultades, logrando soluciones homogéneas adecuadas para las pruebas experimentales (Figura 21), es posible observar que la disolución en HCl 1M (**Figura 21 (a)**) cuenta con un tono más oscuro que la disolución en NaCl 0.6M (**Figura 21 (b)**). Esto permitió continuar la investigación enfocándose exclusivamente en este extracto, cuyas propiedades como inhibidor de corrosión fueron evaluadas de manera detallada, obteniendo resultados significativos al aplicar pruebas gravimétricas y electroquímicas.

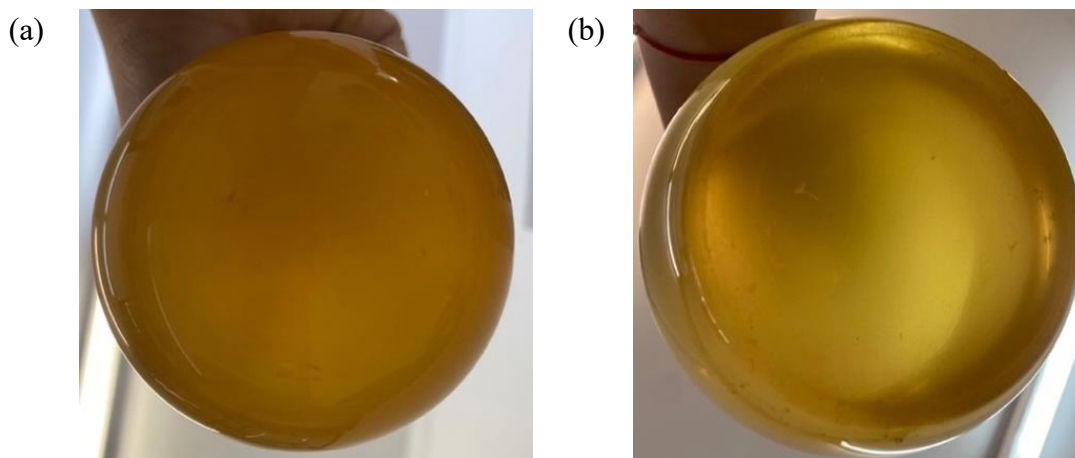


Figura 21. Disolución de *Ganoderma Lucidum* a 1000 ppm. en (a) HCl 1M, (b) NaCl 0.6 M.

Fuente: [Elaboración propia]

Sin embargo, en menos de 24 horas, la disolución de NaCl 0.6 M con extracto de hongo *Ganoderma* genera precipitado significativo (**Figura 22**), lo que afecta la repetibilidad de los ensayos y la confiabilidad de los resultados debido a la incertidumbre de su uso a largo plazo. No obstante, en lugar de descartar inmediatamente el extracto de *Ganoderma Lucidum* en NaCl 0.6 M, se llevaron a cabo pruebas electroquímicas preliminares para evaluar su comportamiento y determinar si la formación del precipitado influía en la respuesta electroquímica del sistema.



Figura 22. Extracto precipitado en la disolución de NaCl 0.6 M con 1000 ppm de *Ganoderma Lucidum* a las 24 horas. Fuente: [Elaboración propia]

5.2. Pruebas de pérdida de masa por inmersión

Para las pruebas, las muestras fueron sumergidas en disoluciones referencia sin añadir extracto, de la misma forma se realizaron las inmersiones con una concentración de 1000 ppm del extracto de *Ganoderma Lucidum* a una temperatura controlada de 23°C durante un período de dos y veinticuatro horas. En la **Tabla 4** se presentan los resultados cuantitativos obtenidos a partir de las mediciones de pérdida de masa, así como el análisis de la eficiencia de inhibición calculada a partir de las ecuaciones (3) y (4).

Al analizar los resultados obtenidos tras las inmersiones durante 2 horas, en HCl 1M se observa que este medio resultó ser altamente agresivo para el acero de bajo carbono, como lo demuestra una tasa de corrosión de $1.7116 \pm 0.1392 \mu\text{m/año}$ y una pérdida de masa de 0.01083 ± 0.00025 g en ausencia del extracto. Este comportamiento agresivo puede atribuirse a la acción de los iones de hidrógeno H^+ presente en la reacción de corrosión del hierro ante HCl, los cuales aceleran el proceso de corrosión al romper la capa pasiva de óxido en la superficie del acero [60]. Sin embargo, al añadir 1000 ppm del extracto de *Ganoderma Lucidum*, se observó una reducción significativa tanto en la pérdida de masa 0.00147 ± 0.00051 g como en la tasa de corrosión $0.2330 \pm 0.0839 \mu\text{m/año}$, resultando en 86.4 % de eficiencia de inhibición del extracto.

Tabla 4. Tasa de corrosión y eficiencia de inhibición de *Ganoderma Lucidum* en medio ácido HCl 1M a partir del ensayo gravimétrico.

Tiempo de inmersión (h)	Disolución	Δ masa (g)	Tasa de corrosión ($\mu\text{m}/\text{año}$)	$\eta_{i_{corr}}$ (%)
2	HCl 1M	0.01083 ± 0.00025	1.7116 ± 0.1392	-
	HCl 1M+1000 ppm	0.00147 ± 0.00051	0.2330 ± 0.0839	86.4
24	HCl 1M	0.33908 ± 0.07794	4.7565 ± 1.0042	-
	HCl 1M+1000 ppm	0.0155 ± 0.00445	0.2173 ± 0.8295	95.4

Fuente: [Elaboración propia]

Los resultados tras las inmersiones por 24 horas demuestran con mayor claridad el efecto de las disoluciones, ya que las muestras en HCl 1M sin extracto resulta en una tasa de corrosión aproximada de $4.7565 \pm 1.0042 \mu\text{m}/\text{año}$ a diferencia de las muestras de acero en HCl 1M con 1000 ppm, las cuales presentan una tasa de corrosión de $0.2173 \pm 0.8295 (\mu\text{m}/\text{año})$, resultando en un porcentaje de inhibición del 95.4%, sugiriendo que el extracto tiene potencial como inhibidor. En la **Figura 23** (a) y (b) se puede observar de forma gráfica la diferencia en las pruebas gravimétricas entre el blanco de HCl y las muestras inmersas en la disolución de HCl 1M con extracto de *Ganoderma Lucidum*, evidenciando cualitativamente que el extracto presente en la disolución disminuye la velocidad de corrosión.

Tabla 5. Tasa de corrosión y eficiencia de inhibición de *Ganoderma Lucidum* en NaCl 0.6M a partir del ensayo gravimétrico.

Tiempo de exposición (h)	Disolución	Δ masa (g)	Tasa de corrosión ($\mu\text{m}/\text{año}$)	$\eta_{i_{corr}}$ (%)
2	NaCl 0.6 M	0.000533 ± 0.00006	0.08382 ± 0.009	-
	NaCl 0.6 M+1000 ppm	0.000133 ± 0.00012	0.02115 ± 0.018	74.7
24	NaCl 0.6 M	0.009233 ± 0.00454	0.12408 ± 0.001	-
	NaCl 0.6 M+1000 ppm	0.003133 ± 0.00196	0.04243 ± 0.027	65.8

Fuente: [Elaboración propia]

Los ensayos en NaCl 0.6M (**Tabla 5**), cuentan con resultados positivos de inhibición, siendo este más alto tras la inmersión a dos horas (74.7%) que a veinticuatro horas (65.8%). En este caso la corrosión se produce principalmente debido al ataque de los iones Cl^- que facilitan la formación de productos de corrosión localizados [61]. Estas son pruebas preliminares para demostrar la viabilidad del extracto como inhibidor, sin embargo, los resultados no son determinantes, ya que pueden verse afectados por error humano; principalmente en la limpieza, ya que si la pieza se encuentra inmersa por un periodo más largo de lo esperado en el decapado o disolución, los resultados pueden variar, especialmente en la masa final. Es importante resaltar que los resultados en este medio fueron menos favorecedores que los obtenidos en la disolución de HCl 1M, lo cual se puede deber a la interacción del medio o a la floculación del extracto en la disolución. En la Figura 23 (c) y (d) es posible observar los productos de corrosión localizados en la muestra inmersa en NaCl 0.6M, mientras que la inmersa en NaCl 0.6M con extracto de *Ganoderma Lucidum* presenta corrosión un poco más generalizada.

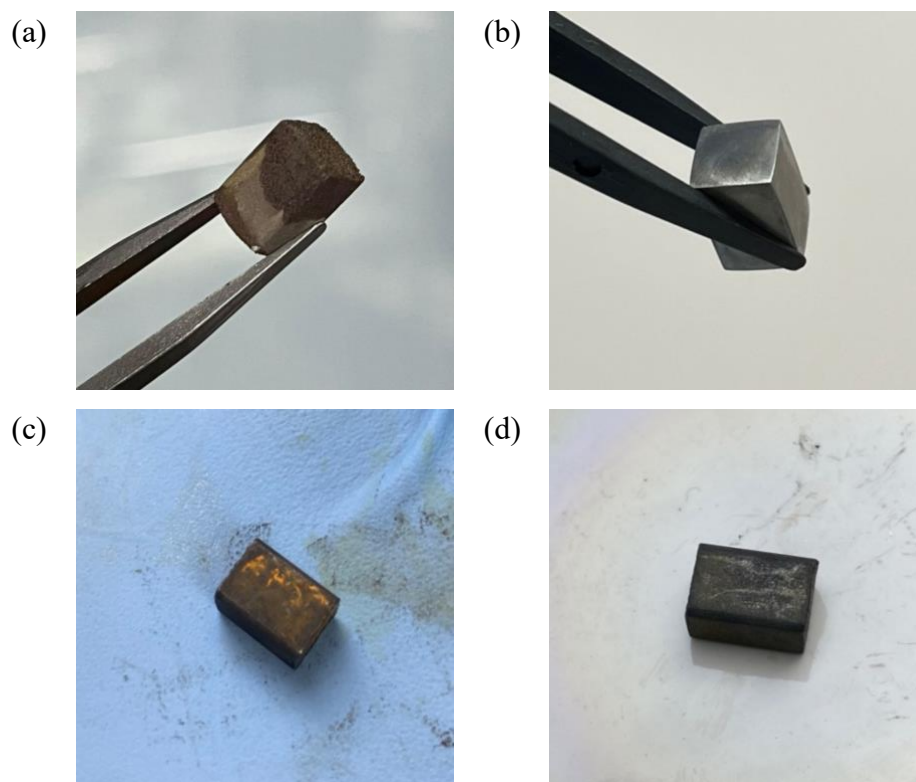


Figura 23. Muestras tras inmersión por 24 horas. (a) HCl 1M, (b) HCl 1M con 1000 ppm de extracto de H.Ganoderma, (c) NaCl 0.6M, (d) NaCl 1.6M con1000 ppm de extracto de H.Ganoderma. Fuente: [Elaboración propia]

5.3. Pruebas electroquímicas

Extracto de *Ganoderma Lucidum* en HCl 1M

5.3.1.1. Curvas Potenciodinámicas

Las curvas de polarización se utilizaron como método primario para evaluar la influencia del extracto de *Ganoderma lucidum* en la cinética de corrosión del acero bajo carbono en un medio ácido de HCl 1M. A partir de estos ensayos, se pueden obtener parámetros de gran importancia como el potencial de corrosión (E_{corr}) y la densidad de corriente de corrosión (i_{corr}), los cuales permiten estimar la velocidad de corrosión y la eficiencia inhibidora del extracto en este medio. En la **Figura 24** se muestran las curvas representativas de los triplicados del ensayo, realizados para cada concentración.

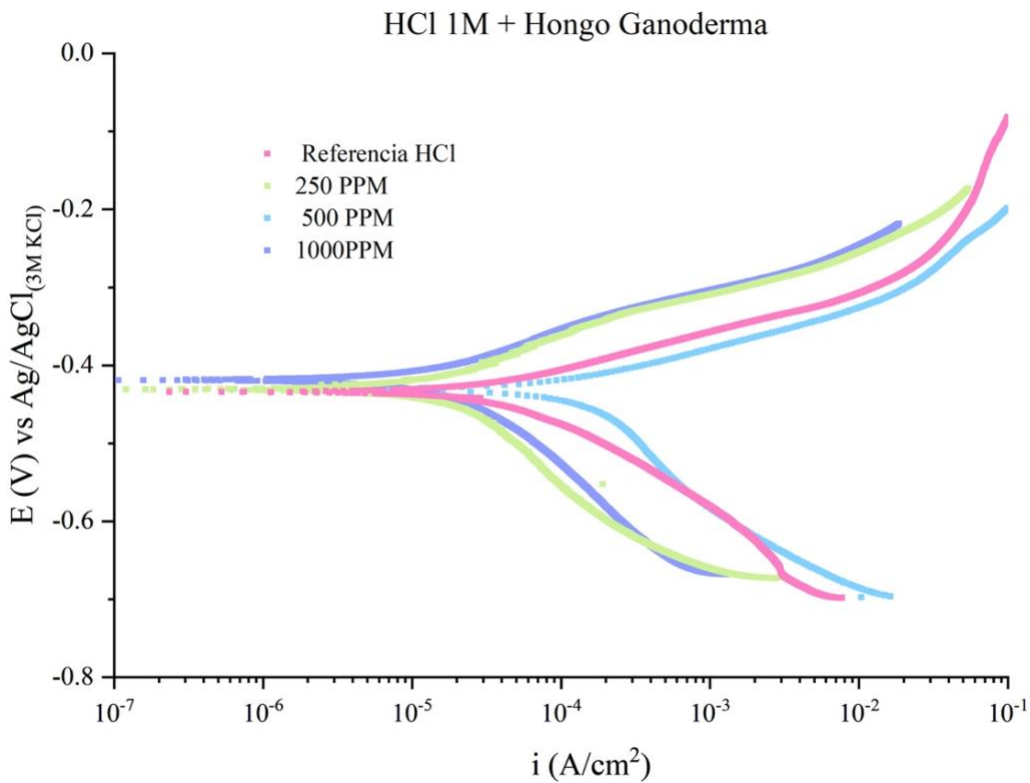


Figura 24. Curvas Potenciodinámicas para HCl 1M con concentraciones de 0 ppm, 250 ppm, 500 ppm y 1000 ppm de *Ganoderma Lucidum*. Fuente: [Elaboración propia]

Al analizar las curvas de polarización obtenidas de los ensayos electroquímicos (**Figura 24**) por medio de Tafel, se obtienen los valores de E_{corr} (potencial de corrosión), de i_{corr} (densidad de corriente), la tasa de corrosión y η (eficiencia de inhibición), los cuales se presentan en la **Tabla 6**, es importante resaltar los cambios en el potencial de corrosión (E_{corr}), en ausencia del extracto, el acero de bajo carbono en HCl 1M presenta un potencial de -421.62 mV, lo que indica una alta actividad electroquímica y predisposición a la corrosión; en las mediciones posteriores a la adición del extracto se evidencia el desplazamiento de los potenciales a valores menos negativos, sugiriendo que el extracto modifica levemente el equilibrio electroquímico de la reacción de corrosión (cinética de la reacción), reduciendo la actividad catódica y/o anódica [62]. El ligero desplazamiento de E_{corr} , sugiere que el extracto de *Ganoderma lucidum* actúa como un inhibidor mixto, reduciendo tanto la reacción de oxidación del metal como la reacción de reducción del hidrógeno, lo cual se respalda con la disminución de i_{corr} , indicando una menor velocidad de corrosión en presencia del inhibidor, siendo un comportamiento característico de inhibidores que se adsorben sobre la superficie metálica modificando la cinética de corrosión [63]. Adicionalmente, en la **Figura 24** se observa cómo las pendientes tanto de la rama anódica como la catódica a concentraciones de 250 ppm y 1000 ppm se ven modificadas, lo cual respalda la teoría de inhibidor mixto, a diferencia de la curva de concentración de 500 ppm, la cual sigue un comportamiento similar a la curva de referencia de HCl 1M.

Tabla 6. Resultados a partir de las curvas potenciodinámicas de HCl 1M con diferentes concentraciones de extracto de Hongo Ganoderma

Concentración	E_{corr} (mV)	i_{corr} ($\mu A/cm^2$)	Tasa de corrosión (mm/year)	$\eta_{i_{corr}}$ (%)
HCl 1M	-421.6155	39.72 \pm 5.04	0.5952 \pm 0.12	-
HCl 1M + 250 ppm	-412.8778	6.378 \pm 1.08	0.0913 \pm 0.05	83.94
HCl 1M + 500 ppm	-400.2986	17.476 \pm 5.05	0.2407 \pm 0.07	50.45
HCl 1M + 1000 ppm	-416.0725	3.944 \pm 1.013	0.0591 \pm 0.03	90.07

Fuente: [Elaboración propia]

Por otro lado, la densidad de corriente de corrosión (i_{corr}), obtenida a partir de las pendientes de tafel, es un indicador de la velocidad de disolución del metal, permitiendo calcular

la eficiencia inhibidora del extracto. En la **Tabla 6** es posible observar la reducción significativa en la densidad de corrosión, evidenciando como la eficiencia del inhibidor en las concentraciones de 250 ppm (83.94%) y 1000 ppm (90.07%) es mayor que a 500 ppm (50.45%). La reducción de i_{corr} en presencia del inhibidor indica una menor velocidad de disolución del acero, sugiriendo la posibilidad de formación de una película protectora que limita la interacción del metal con el medio corrosivo [64]. Al comparar estos resultados con los obtenidos en las pruebas de pérdida de masa, se observa una gran diferencia en cuanto al porcentaje de inhibición, lo cual puede ser influenciado por el tiempo de duración de los ensayos aplicados, ya que los ensayos electroquímicos cuentan con una alta sensibilidad debido al equipo utilizado, estos miden una respuesta instantánea del sistema de corrosión, detectando hasta los cambios más pequeños, mientras que las pruebas de pérdida de masa toma más tiempo beneficiando de esta manera la estabilización del inhibidor, sin embargo, en su proceso existe una alta probabilidad de error humano en las mediciones [65].

Al obtener resultados positivos del uso de *Ganoderma Lucidum* en HCl 1M en las curvas de polarización, dado a que se evidenció una reducción considerable en la velocidad de corrosión, sugiriendo una interacción favorable entre los compuestos del extracto y la superficie del acero, indicando un efecto protector del extracto en medio ácido, se decidió realizar el análisis de espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS). Esta técnica permite profundizar en la comprensión del mecanismo de inhibición, evaluando la formación y estabilidad de la película protectora adsorbida sobre la superficie metálica, así como su influencia en la resistencia a la corrosión.

5.3.1.2. Impedancia electroquímica (EIS)

Al aplicar ensayos de espectroscopia de impedancia electroquímica se obtuvieron 3 diferentes diagramas, los cuales brindan información de gran importancia sobre los procesos que suceden sobre la superficie del material durante los ensayos. Primeramente, se analizó el diagrama de Nyquist (**Figura 25**), donde se observa un cambio significativo en los diámetros de los semicírculos, especialmente en las concentraciones de 250 ppm y 1000 ppm, lo cual demuestra un aumento en la resistencia a la polarización del sistema, lo que se atribuye a una mayor dificultad de interacción entre el metal y el medio corrosivo.

HCl 1M + Hongo Ganoderma

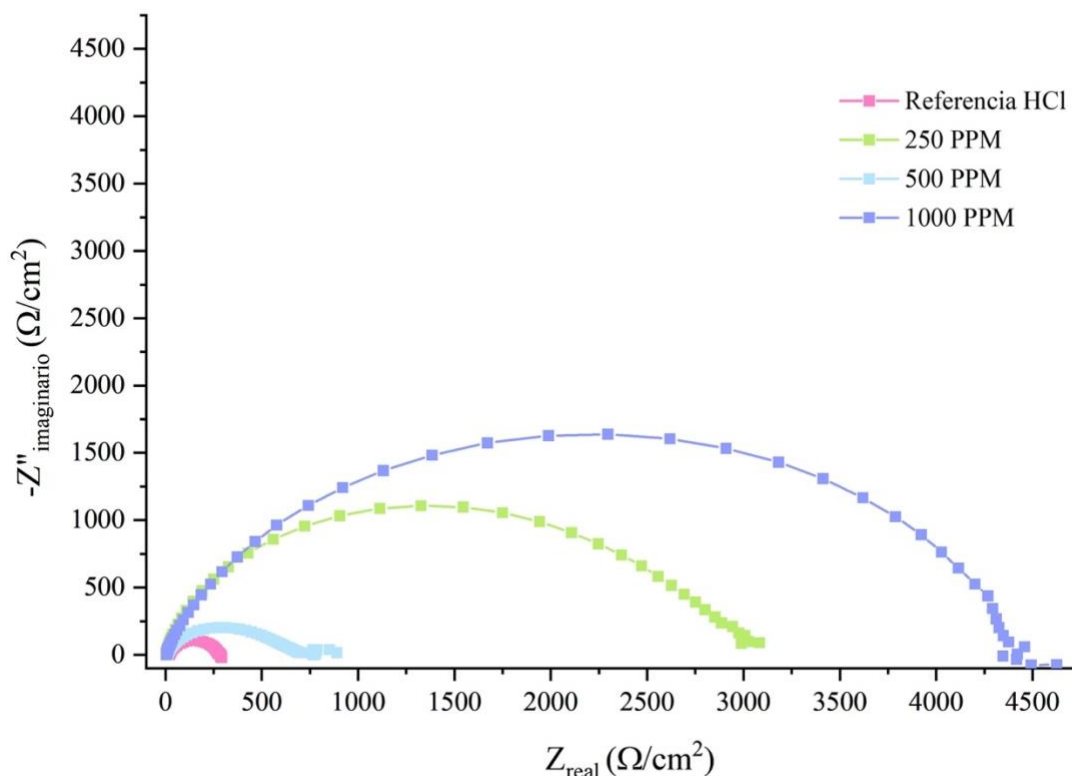


Figura 25. Diagrama de Nyquist para HCl 1M con concentraciones de 0 ppm, 250 ppm, 500 ppm y 1000 ppm de *Ganoderma Lucidum*. Fuente: [Elaboración propia]

A partir de este gráfico (**Figura 25**) es posible obtener la resistencia a la polarización (R_p) para cada una de las concentraciones de extracto de *Ganoderma Lucidum* aplicadas en HCl 1M. Los valores obtenidos de resistencia a la polarización y eficiencia de inhibición a partir de la R_p se muestran en la **Tabla 7** muestran la eficiencia de inhibición a partir de la R_p . Estos resultados al igual que la eficiencia de inhibición a partir de las curvas de polarización no cuenta con un comportamiento lineal respecto al aumento de concentración de extracto en la disolución, comprobando que el extracto es más efectivo a 1000 ppm, (85.71%) y a 250 ppm (80.21%) que a 500 ppm (5.37%). Este tipo de comportamiento, lo que sugiere es la formación de una barrera protectora sobre la superficie del acero bajo carbono, especialmente a 1000 ppm y 250 ppm donde se espera la formación de una capa homogénea sobre la superficie, mientras a 500 ppm puede que se forme igualmente una capa, con la diferencia de que puede que esta no sea homogénea, lo que permite que se den procesos de corrosión en la superficie del metal [64].

Tabla 7. Promedio de la Variación de la Resistencia de Polarización (R_p) y la Eficiencia de Inhibición (η_{R_p}) en Presencia del Extracto de *Ganoderma lucidum* a partir de EIS por concentración.

Concentración	R_p (Ω/cm^2)	η_{R_p} (%)
HCl 1M	562.20	-
HCl 1M + 250 ppm	2840.82	80.21
HCl 1M + 500 ppm	594.11	5.37
HCl 1M + 1000 ppm	3933.01	85.71

Fuente: [Elaboración propia]

A partir del mismo diagrama (**Figura 25**), es posible calcular la capacitancia de doble capa (C_{dl}), el cual se muestra en la **Tabla 8** en conjunto con su eficiencia, mostrando una clara disminución de la capacitancia de la doble capa, sin embargo la concentración con los resultados más notorios fue a 1000 ppm, ya que obtuvo una eficiencia del 69.45% por medio de la reducción de la capacitancia de la doble capa; sugiriendo que se forma una capa con mayor homogeneidad, más compacta, bloqueando de forma más efectiva la transferencia de carga [64]. Estos resultados muestran una clara diferencia respecto a lo observado a partir de las R_p ya que a 500 ppm hay una mayor separación dieléctrica entre el metal y el medio corrosivo en comparación a 250 ppm, lo cual sugiere que en esta concentración, la capa generada puede ser una película extensa pero menos compacta que a 250 ppm, confirmando lo mencionado anteriormente, de manera que permite que continúe cierta actividad corrosiva en la superficie, por lo que en general presenta una menor resistencia a la corrosión en el resto de parámetros analizados [64].

Tabla 8. Promedio de la variación de la capacitancia de doble capa y la eficiencia de inhibición en presencia del extracto de *Ganoderma lucidum*.

Concentración	C_{dl} ($\mu F/cm^2$)	$\eta_{C_{dl}}$ (%)
HCl 1M	34.583	-
HCl 1M + 250 ppm	28.033	11.29
HCl 1M + 500 ppm	30.690	18.95
HCl 1M + 1000 ppm	10.558	69.45

Fuente: [Elaboración propia]

Adicionalmente, a partir de la EIS se obtuvo los diagramas de bode, los cuales se muestran en la **Figura 26** y **Figura 27**, en estos gráficos se observan variaciones significativas en el comportamiento electroquímico del sistema, representando el comportamiento de la interfase entre el electrolito y la superficie de la muestra.

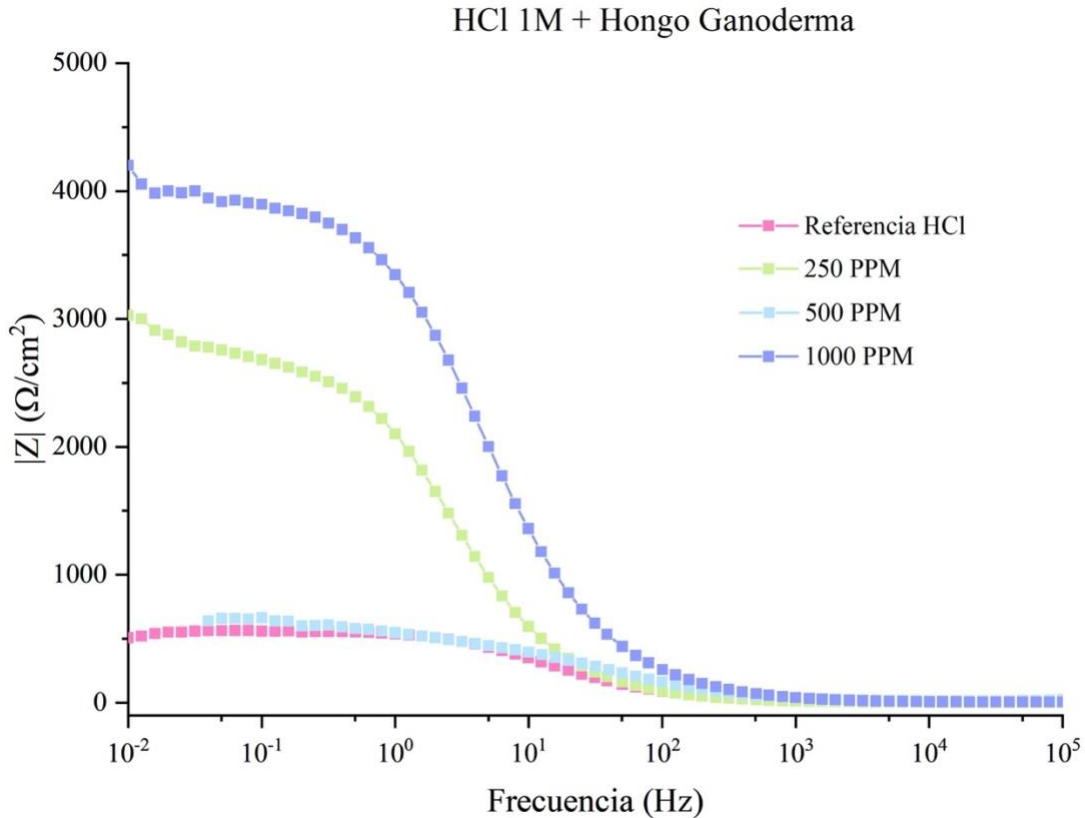


Figura 26. Bode: Módulo de impedancia respecto a la frecuencia para HCl 1M con concentraciones de 0PPM, 250PPM, 500PPM y 1000PPM de H. Ganoderma. Fuente:

[Elaboración propia]

En la **Figura 26** se muestra el diagrama de impedancia respecto a la frecuencia, donde es posible observar claramente que al añadir extracto al medio, la impedancia a bajas frecuencias ($10^{-2} - 10^0$ Hz) aumenta, lo que sugiere una mayor resistencia a la corrosión, apoyando los resultados obtenidos anteriormente en las curvas de polarización y en el diagrama de Nyquist. Es importante resaltar que a 500 ppm de extracto, no hay gran diferencia respecto al blanco de HCl 1M, de igual manera, respaldando los resultados obtenidos anteriormente. Asimismo, la concentración que mostró un mayor incremento en la impedancia fue a 1000 ppm de Ganoderma

Lucidum en HCl, seguida por 250 ppm la cual tuvo un aumento considerable. Por otro lado, a altas frecuencias ($10^4 - 10^5$ Hz) se observa como la impedancia es prácticamente constante en todas las concentraciones, estas frecuencias representan la resistencia del electrolito, por lo que se descarta que el extracto funcione modificando las reacciones electroquímicas del sistema [42], [64]. En frecuencias medias ($10^0 - 10^3$ Hz) se observa una caída progresiva en la impedancia, lo cual se asocia con la capacitancia de la doble capa, apoyando la hipótesis de que el extracto actúa como barrera entre el electrolito y la muestra, lo cual reduce la transferencia de carga, en la concentración de 500 ppm se observa que la caída de impedancia es más rápida, sugiriendo que la película protectora no es efectiva o lo suficiente estable para ralentizar los procesos de corrosión. Es posible observar los triplicados del ensayo por concentración del electrolito en el **Apéndice 5**.

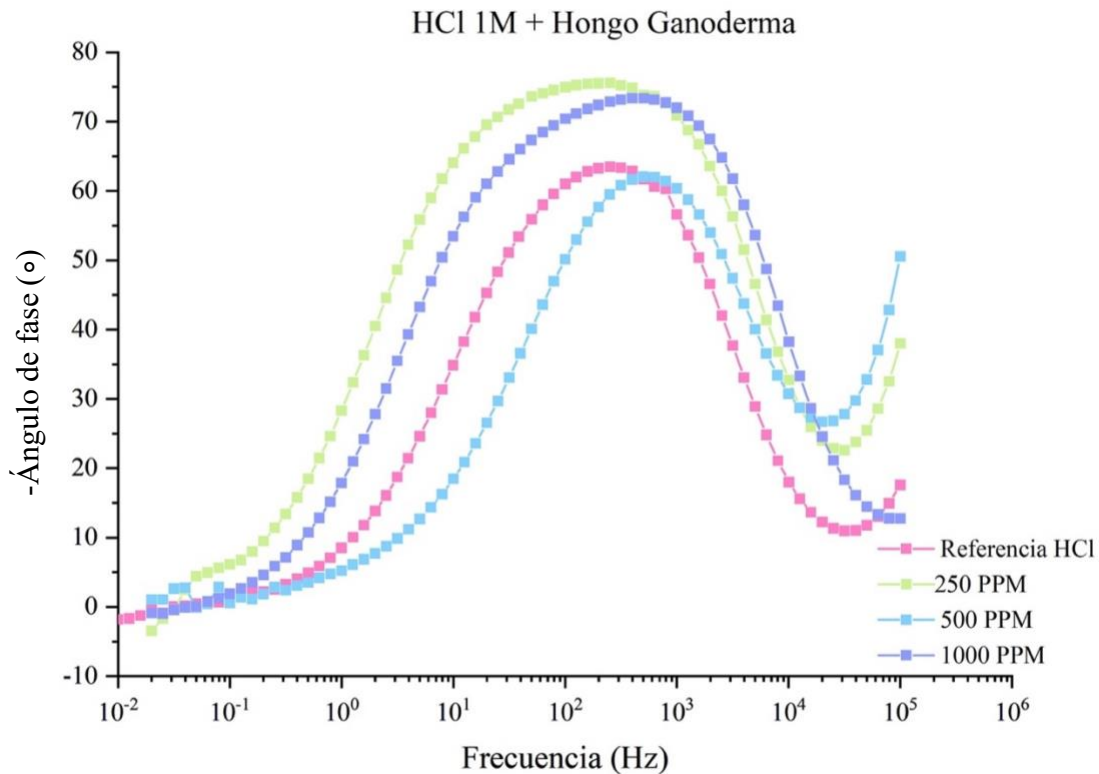


Figura 27. Diagrama de Bode: Ángulo de fase respecto Frecuencia para HCl 1M con concentraciones de 0PPM, 250PPM, 500PPM y 1000PPM de H. Ganoderma. Fuente: [Elaboración propia]

En la **Figura 27** se presenta el diagrama de bode que representa el cambio de ángulo de fase respecto a la frecuencia aplicada durante el ensayo de EIS. Al analizar este gráfico se observa

que a 500 ppm y la referencia HCl 1M, el diagrama de fase muestra un solo pico bien definido, lo que indica que solo hay un proceso de transferencia de carga dominante sin efectos significativos de la formación de una película protectora, lo cual concuerda con todos los resultados mencionados anteriormente. En el caso de las concentraciones de 250 ppm y 1000 ppm se observa un ligero cambio en el pico de los diagramas, mostrando un ensanchamiento de este, lo que sugiere la posibilidad de que el sistema cuenta con dos diferentes constantes de tiempo, estos ensanchamientos o cambios, los cuales sugieren a estas dos concentraciones (1000 ppm y 250 ppm) se genera una película protectora sobre la superficie de la muestra, siendo esta más densa y estable [42]. Es importante resaltar que según el diagrama de ángulo de fase respecto a la frecuencia se observa que a 1000 ppm el ángulo de fase máximo es menor que a 250 ppm, lo que se podría atribuir a que la capa que se forma es homogénea y menos dependiente de los efectos capacitivos, ya que su principal forma de inhibición es restringiendo la transferencia de carga, aumentando así la resistencia a la polarización. Es posible observar los triplicados del ensayo por concentración del electrolito en el **Apéndice 6**.

5.3.1.3. Evaluación de las isotermas de adsorción

El estudio de las isotermas de adsorción permite comprender el mecanismo mediante el cual el extracto de hongo *Ganoderma* interactúa con la superficie de las muestras de acero en HCl 1M como medio ácido. En la **Tabla 9**, se presentan los parámetros calculados para evaluar distintos modelos de adsorción, considerando la fracción de cobertura (θ) obtenida a partir tanto de la resistencia a la polarización (R_p) y la capacitancia de la doble capa (C_{dl}).

Tabla 9. Parámetros calculados para la evaluación de las isotermas de adsorción del extracto de *Ganoderma lucidum* sobre acero en HCl 1M.

Concentración (ppm)	C (M)	θ_{Rp}	θ_{Cdl}	C/θ_{Rp}	$\ln(C)$	$\ln(\theta_{Rp})$	$\ln(\theta_{Cdl})$
250	0,00025	0,8021	0,1129	0,000312	-8,29405	-0,22052	-2,18125
500	0,0005	0,0537	0,1895	0,009311	-7,6009	-2,92434	-1,66337
1000	0,001	0,8571	0,6945	0,001167	-6,90776	-0,1542	-0,36456

Fuente: [Elaboración propia]

Los datos experimentales fueron graficados según los modelos de Langmuir, Freundlich y Temkin, de la misma manera se realizó el ajuste lineal en cada uno de los modelos con el fin de identificar el que mejor se ajuste a los datos obtenidos. Como se observa en la **Tabla 10**, el modelo que presentó el mejor ajuste fue el de Temkin (ver **Figura 29**), con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.8468$, lo que sugiere que la adsorción del extracto de *Ganoderma lucidum* sobre la superficie de las muestras acero bajo carbono no sigue un comportamiento ideal de monocapa homogénea como se plantea en el modelo de Langmuir, sino que podría depender de las interacciones moleculares dentro de la capa adsorbida en la superficie de las muestras. Este resultado coincide con lo que se ha observado en otros estudios sobre el uso de extractos naturales como inhibidores de corrosión. La razón detrás de esto es que estos compuestos suelen contener varios centros activos, es decir, partes específicas de sus moléculas que pueden interactuar con la superficie del metal. Estos centros, como los grupos funcionales formados por oxígeno, nitrógeno o azufre actúan como puntos de anclaje, permitiendo que el inhibidor se adhiera de diferentes formas, al hacerlo, crean una barrera protectora que reduce la corrosión [66]. Sin embargo, debido a la variedad de interacciones que pueden ocurrir, estos compiten por espacio, causando que la forma en la que el inhibidor se adhiere no siempre es completamente uniforme, lo que explica por qué este modelo de adsorción es el que mejor describe su comportamiento [66], [67]. Explicando de igual manera el comportamiento no lineal observado las eficiencias de inhibición calculadas a partir de la densidad de corrosión ($\eta_{i_{corr}}$), resistencia a la polarización (η_{R_p}) y capacitancia de la doble capa ($\eta_{C_{dl}}$).

Tabla 10. Evaluación de la calidad del ajuste en las isothermas de adsorción para *Ganoderma Lucidum* en HCl 1M.

Modelo de adsorción	Pendiente de la recta	Calidad del ajuste lineal (R^2)
Langmuir	-0.0135 ± 0.12937	0.01077
Freundlich	0.04784 ± 2.2797	0.000449182
Temkin	0.41854 ± 0.178	0.84684

Fuente: [Elaboración propia]

Por otro lado, los modelos de Langmuir y Freundlich mostraron coeficientes de ajuste significativamente bajos, $R^2 = 0.01077$ y $R^2 = 0.00045$ respectivamente como se muestra en la

Tabla 10 lo que indica que la adsorción del extracto no sigue los comportamientos ideales descritos por estos modelos ya que no se presenta una cobertura uniforme (Freundlich) ni responde a un proceso estrictamente físico o reversible (Langmuir) [67], [68]. Los diagramas de estos modelos y sus respectivos ajustes lineales se pueden observar en la **Figura 28**.

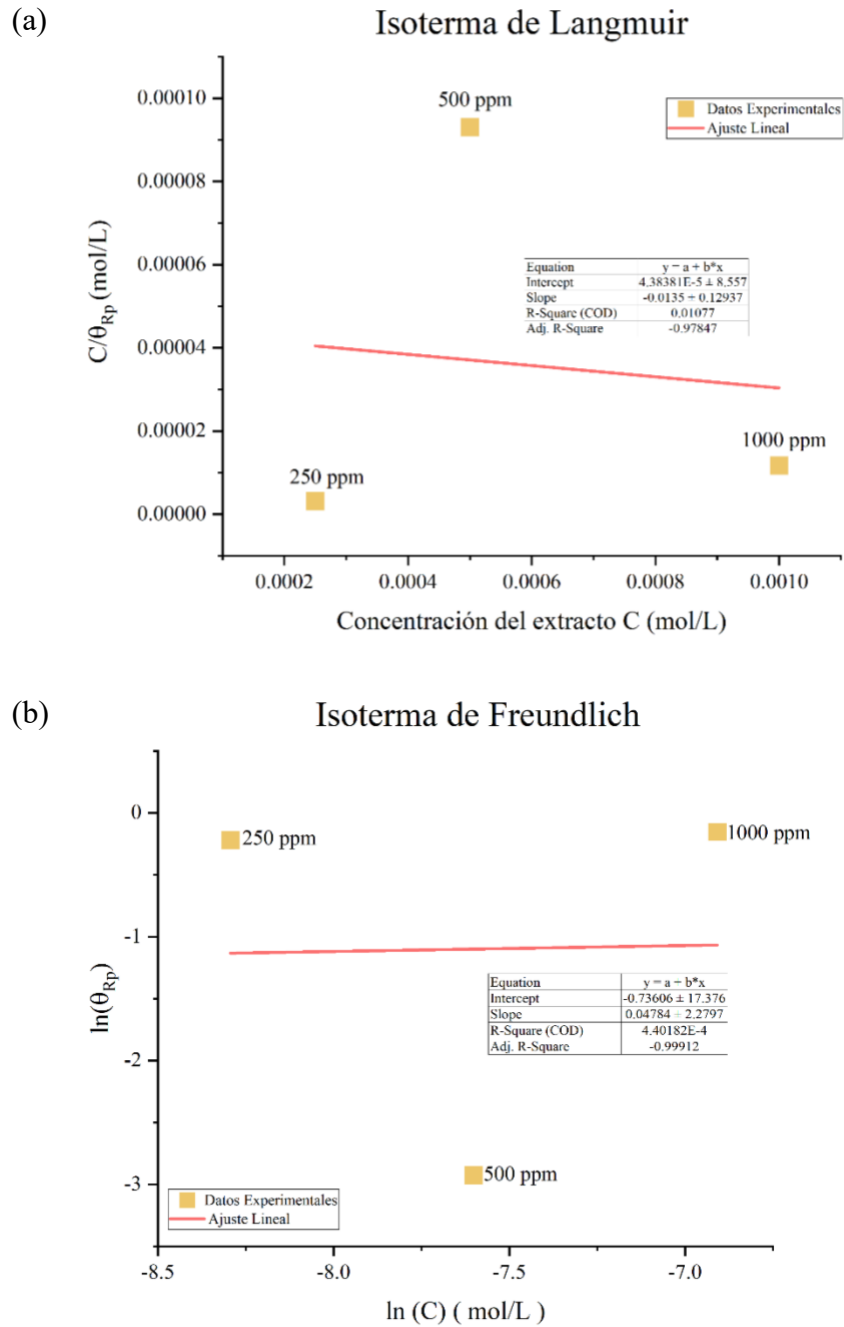


Figura 28. Isotermas. (a) Langmuir. (b) Freundlich. Fuente: [Elaboración Propia]

En la **Figura 29**, se presenta la isoterma ajustada al modelo de Temkin, donde se observa una tendencia lineal entre la fracción de cobertura según C_{dl} y el logaritmo natural de la concentración del extracto en la disolución, lo que sugiere que la adsorción del extracto sobre el acero ocurre con una distribución de energías heterogénea, lo que puede estar relacionado con la formación de una película inhibidora con interacciones entre las moléculas adsorbidas, mostrando una notoria variación en la concentración de 500 ppm, concordando con los resultados obtenidos previamente [52], [53].

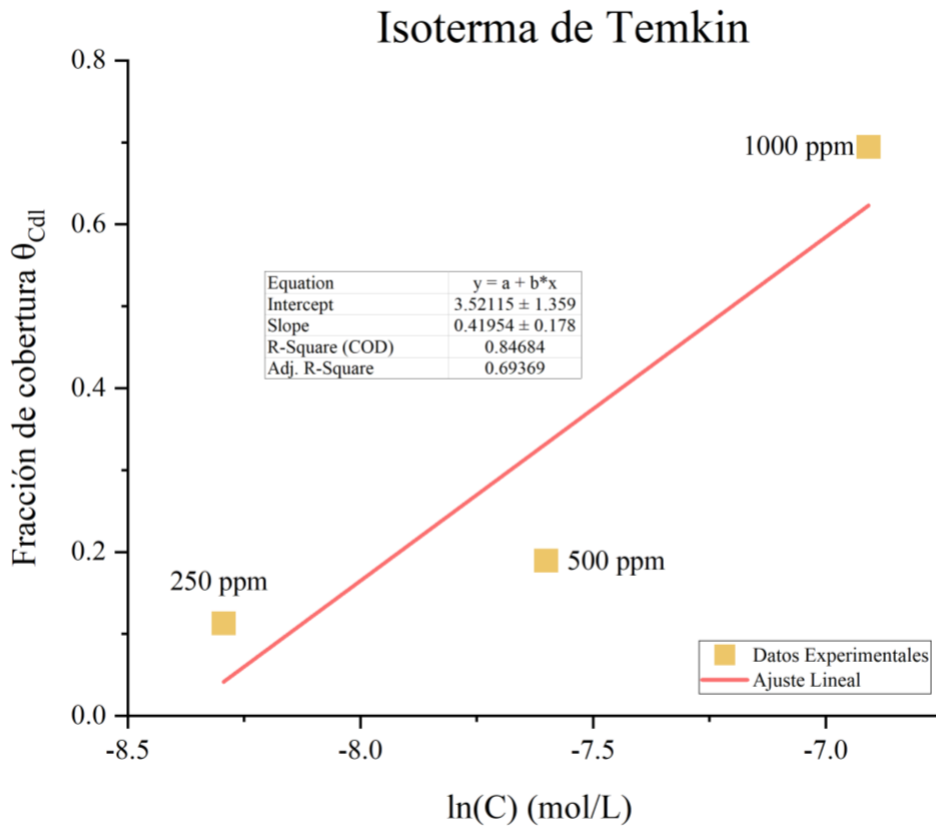


Figura 29. Isoterma según el modelo de Temkin. Fuente: [Elaboración Propia]

Extracto de *Ganoderma Lucidum* en NaCl 0.6 M

5.3.1.4. Curvas de polarización

Las curvas de polarización permiten evaluar la influencia del extracto de *Ganoderma lucidum* en la cinética de corrosión del acero bajo carbono en un medio neutro de NaCl 0.6M. A partir de estos ensayos, se pueden obtener parámetros de gran importancia como el potencial de corrosión (E_{corr}) y la densidad de corriente de corrosión (i_{corr}), los cuales permiten estimar la

velocidad de corrosión y la eficiencia inhibidora del extracto en este medio. En la **Figura 30** se muestran las curvas representativas de los resultados de los ensayos triplicados realizados para cada concentración.

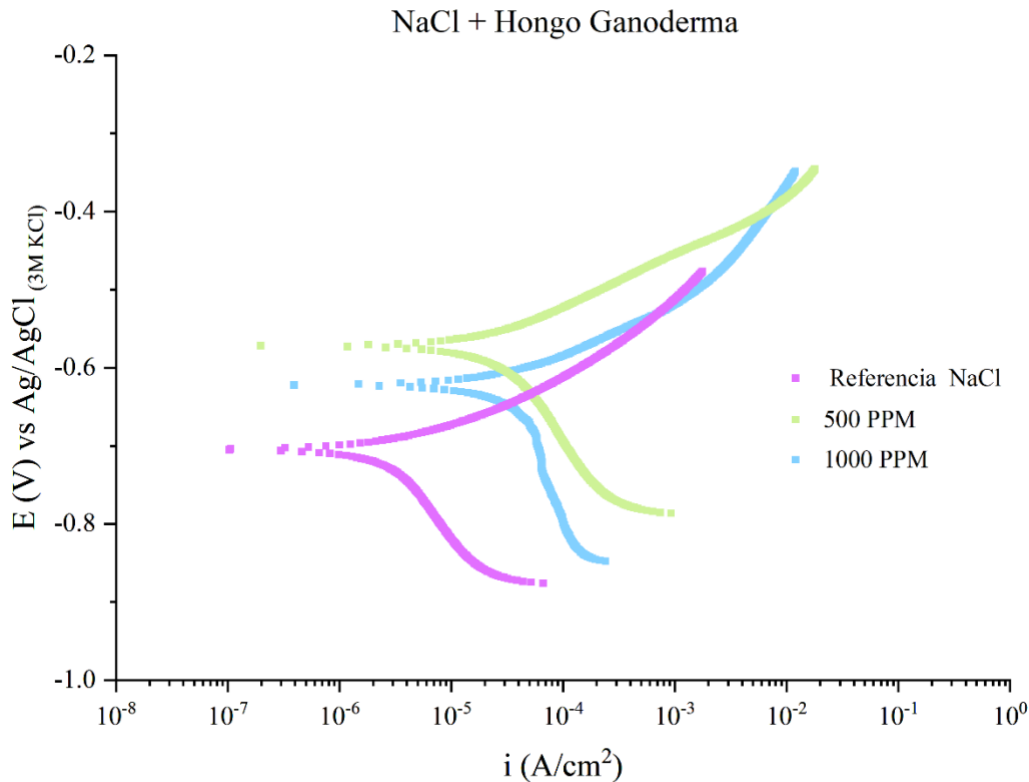


Figura 30. Curvas Potenciodinámicas para NaCl 0.6 M con concentraciones de 0 ppm, 500 ppm y 1000 ppm de Ganoderma Lucidum. Fuente: [Elaboración propia]

En la **Figura 30** se puede observar como las curvas con extracto de hongo Ganoderma modifican su potencial de corrosión (E_{corr}), desplazándose a valores menos negativos, demostrando que se presenta una modificación en la cinética de las reacciones presentes en el proceso de corrosión; sin embargo, también se puede observar cómo se presenta un aumento en los valores de la densidad de corrosión (i_{corr}), lo que puede sugerir que el extracto no trabaja como inhibidor de corrosión en este medio. Para confirmarlo se analizaron las curvas de polarización, obteniendo los valores de la densidad de corriente para cada una de las concentraciones.

Tabla 11. Resultados a partir de las curvas potenciodinámicas de NaCl 0.6M con diferentes concentraciones de extracto de Hongo Ganoderma.

Concentración	E_{corr} (mV)	i_{corr} ($\mu A/cm^2$)	CR (mm/year)	$\eta_{i_{corr}}$ (%)
NaCl 0.6 M	-688.8833	5.158 ± 2.017	0.08 ± 0.03	-
500 ppm	-592.7531	36.551 ± 11.711	0.55 ± 0.18	-
1000 ppm	-620.8662	55.493 ± 9.016	0.83 ± 0.14	-

Fuente: [Elaboración propia]

Los valores obtenidos en la **Tabla 11** demuestran que la referencia en NaCl 0.6M presenta un E_{corr} de -688.88 mV y una i_{corr} de $5.158 \mu A/cm^2$, lo que se traduce en una tasa de corrosión de 0.08 mm/año. Al incorporar el extracto de *Ganoderma lucidum*, se observa un desplazamiento en E_{corr} hacia valores más positivos en ambas concentraciones (500 y 1000 ppm). Sin embargo, la densidad de corriente de corrosión aumenta drásticamente hasta $36.55 \mu A/cm^2$ para 500 ppm y $55.49 \mu A/cm^2$ para 1000 ppm, lo que resulta en una tasa de corrosión mucho más elevada respecto a la muestra sin inhibidor (0.55 mm/año y 0.83 mm/año, respectivamente), cual indica que el extracto no solo no reduce la corrosión, sino que podría estar acelerándola.

Debido a los resultados positivos de las pruebas de pérdida de masa utilizando el extracto de *Ganoderma Lucidum* en medio neutro (NaCl 0.6 M) se planteó realizar ensayos electroquímicos preliminares a pesar de que se observó que la disolución flocula en menos de 24 horas, lo que sugiere un comportamiento poco estable del extracto en este medio. Esto con el fin de confirmar o rechazar los resultados obtenidos a partir de las pruebas gravimétricas, debido a que estas son más propensas a tener error humano en sus resultados.

A diferencia de lo observado en HCl 1M, donde el extracto de *Ganoderma lucidum* mostró una capacidad inhibitoria considerable, en NaCl 0.6M su presencia no solamente fue ineficaz para reducir la velocidad de corrosión, sino que pareció contribuir a su incremento, indicando que el mecanismo de adsorción del extracto y su interacción con la superficie metálica dependen fuertemente del medio en el que se disuelve, adicionalmente, se puede decir que su aplicación en soluciones neutras podría no ser viable como inhibidor de corrosión. Debido a esto, no se realizó el análisis de espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS), ya que esta técnica se emplea

para estudiar el mecanismo de inhibición de un compuesto. Dado que en este caso no se evidenció un efecto inhibitor, no se consideró necesario profundizar en la caracterización del sistema a través de esta técnica.

5.4. Métodos de Caracterización

5.4.1. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Tras cuatro días de inmersión se analizaron las muestras de acero de bajo carbono en el SEM, se observaron tanto la muestra inmersa solamente en HCl 1M como en HCl 1M con 1000 ppm de extracto de *Ganoderma Lucidum*.

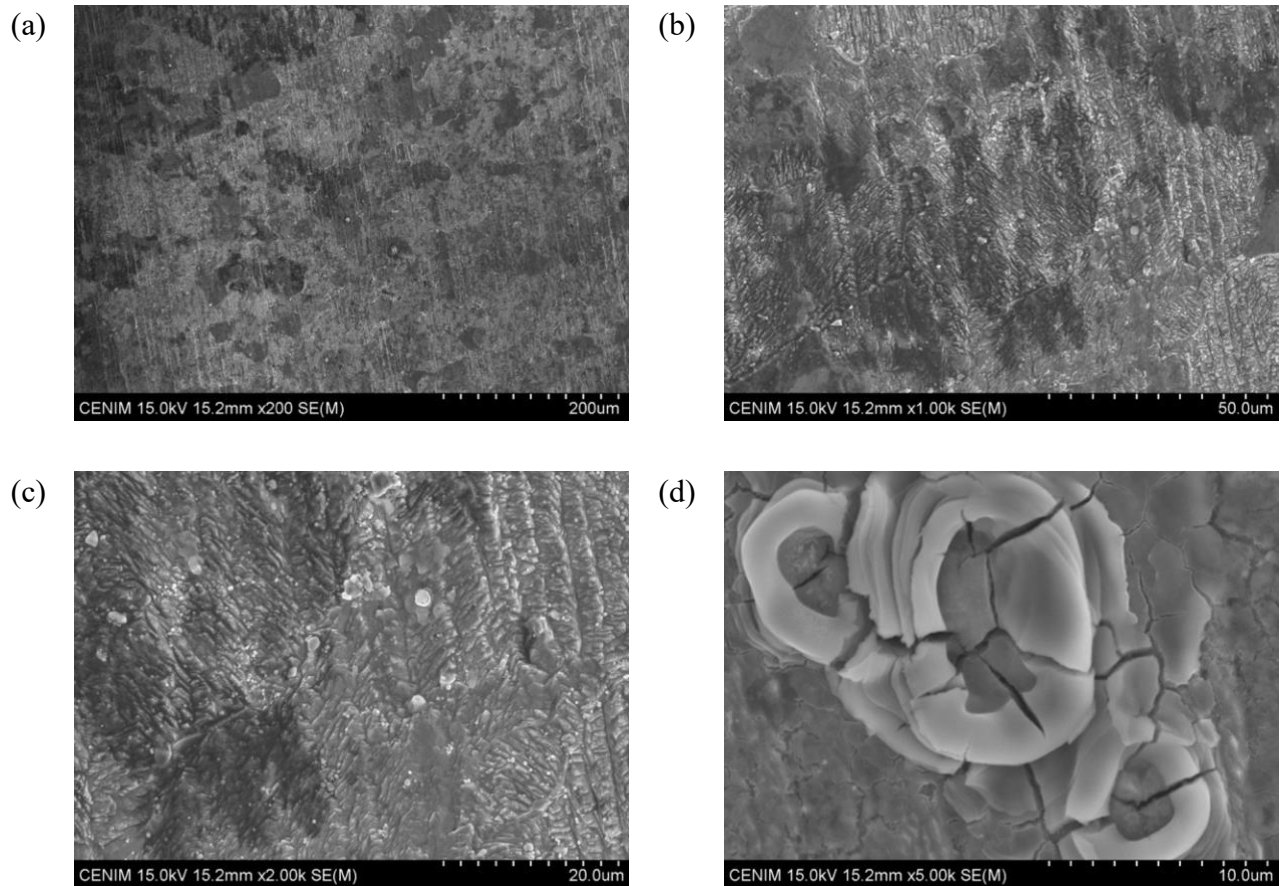


Figura 31. Imágenes de muestras inmersas durante cuatro días en HCl 1M (SEM), con diferentes magnificaciones: (a)200x, (b)1.000x, (c)10.000x, (d)25.000x.

Fuente: [Elaboración propia]

En la **Figura 31** se presentan las imágenes obtenidas en el SEM de la muestra inmersa solamente en HCl 1M. En la **Figura 31(a)** y **(b)** a pesar de que se observan marcas del pulido, las cuales suelen propiciar el ataque localizado ya que en estas zonas el ácido tiende a penetrar más fácilmente la superficie del metal, se evidencia un claro ataque generalizado en la superficie del

acero de bajo carbono. En estas mismas imágenes, es importante destacar el evidente contraste de algunas zonas, donde se muestran zonas más oscuras que otras, lo cual muestra los granos y sus límites después del ataque del HCl 1M, de igual manera, algunas zonas específicas pueden evidenciar la presencia de depósitos de productos de corrosión. En la **Figura 31 (c)** es posible observar pequeñas incrustaciones, las cuales se identifican como restos de contaminación de las lijas utilizadas en la preparación de muestras, lo cual se confirma por medio del EDS, ya que se identifican estas partículas como silicio; además, es posible observar una superficie sumamente rugosa, ya que la corrosión tiende a aumentar la rugosidad de la superficie atacada. En la **Figura 31 (d)** se observa un producto de corrosión que se presenta en forma de rosetas, mostrando grietas en la superficie del acero.

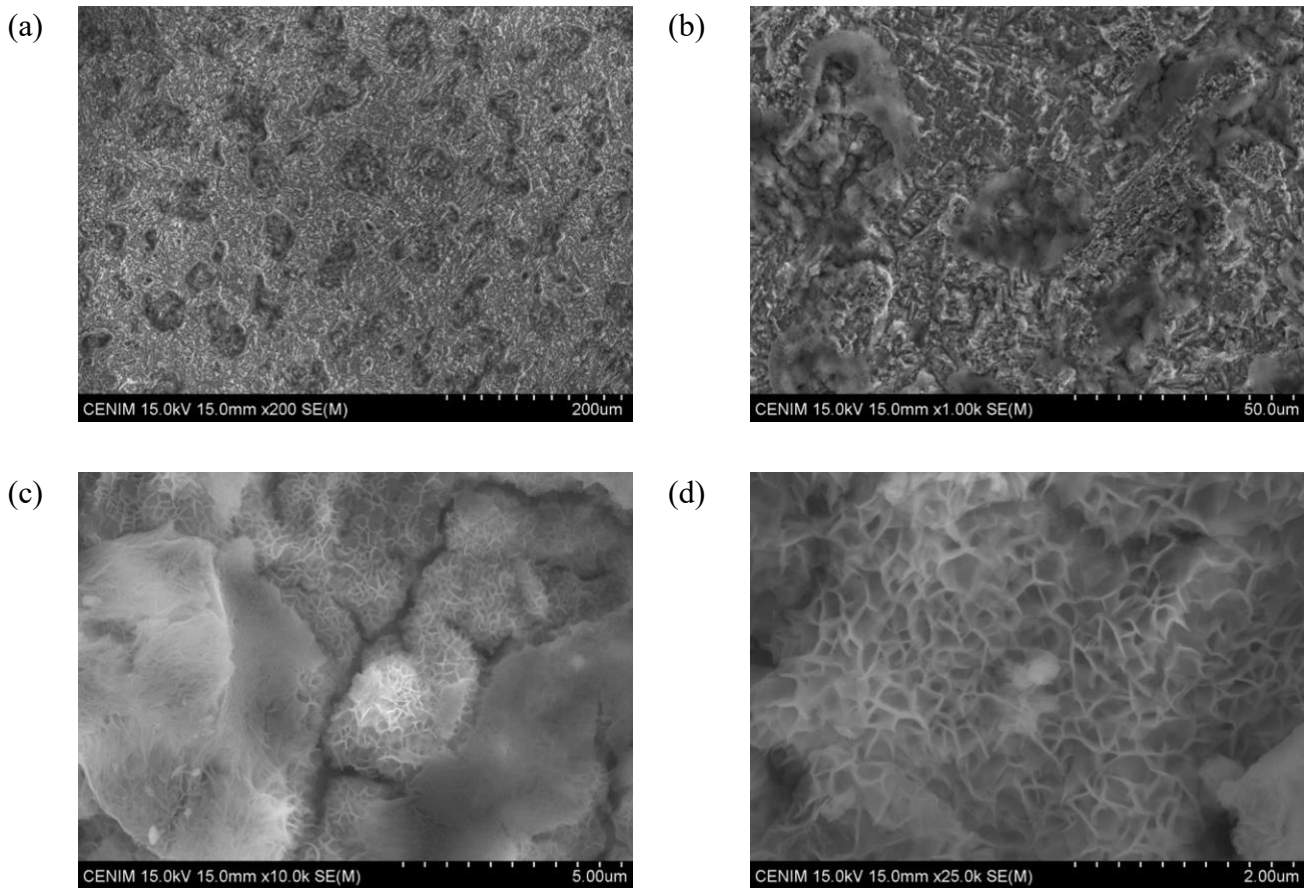


Figura 32. Imágenes de muestras inmersas por cuatro días en HCl 1M con 1000ppm H. Ganoderma (SEM), con diferentes magnificaciones (a)200x, (b)1.000x, (c)10.000x, (d)25.000x.

Fuente: [Elaboración propia]

En la **Figura 32** se muestra las imágenes obtenidas de las muestras inmersas en HCl 1M con extracto de *Ganoderma Lucidum*, el que se ha demostrado por medio de las pruebas gravimétricas y electroquímicas que cuenta con propiedades inhibitoras en este medio. En **Figura 32 (a)** se evidencia en aspecto uniforme en la superficie de la muestra, adicionalmente se observa que la superficie se encuentra recubierta con una capa abultada relativamente homogénea. Se continúa investigando estas zonas abultadas, lo que lleva a la **Figura 32 (b)**, lo cual muestra que este recubrimiento cuenta con zonas más voluminosas que otras con aspecto “gomoso” lo cual es morfología típica de depósitos orgánicos, lo cual indica que el inhibidor genera un recubrimiento durante la inmersión. En la **Figura 32 (c)** y **(d)** se continuó magnificando las zonas donde se observa el recubrimiento, presentando que la película generada por el extracto cuenta con un patrón tipo panal, este tipo de morfología indica la formación de una capa orgánica.

Al comparar ambos análisis, es posible resaltar que en la muestra inmersa en la disolución con extracto de *Ganoderma Lucidum* cuenta con menor agresión por parte del medio ácido, donde no se observan picaduras, ni formaciones laminares comunes de los productos de corrosión, presentes en la muestra inmersa solamente en HCl 1M. En lugar de esto, en la muestra inmersa en la disolución de HCl 1M con el extracto de *Ganoderma Lucidum* es posible observar la cobertura de la superficie con la capa reticulada. Debido a esta cobertura, la superficie metálica se encuentra prácticamente enmascarada, generando una barrera en la superficie, apoyando los resultados positivos respecto a la inhibición del extracto de *Ganoderma Lucidum*.

5.4.2. Medición de rugosidad

Los cambios de rugosidad en las muestras sometidas a ensayo de corrosión en medio de HCl 1M, con y sin la presencia de extracto de *Ganoderma lucidum*, permiten cuantificar el daño superficial ocasionado por el ataque ácido, evaluando indirectamente, la eficiencia inhibitora del extracto. Para esto, se realizaron mediciones de rugosidad promedio (R_a) antes y después del proceso corrosivo, determinando la variación (ΔR_a) en cada una de las condiciones analizadas. De esta forma, se obtiene un parámetro que describe cómo la superficie se ve afectada tras la exposición al medio agresivo y en qué medida la adición del extracto contribuye a minimizar dichos efectos.

Tabla 12. Cambios en la rugosidad de la superficie tras ensayos electroquímicos en la disolución de *Ganoderma Lucidum* en HCl 1M.

Concentración	R_a inicial (μm)	R_a final (μm)	ΔR_a (μm)	% reducido
HCl 1M	0.0798 \pm 0.0177	0.8792 \pm 0.0841	0.7994 \pm 0.0859	
250 ppm	0.0776 \pm 0.0193	0.7982 \pm 0.1221	0.7205 \pm 0.1236	9,86
1000 ppm	0.0405 \pm 0.0276	0.7295 \pm 0.0639	0.6890 \pm 0.0697	13,8

Fuente: [Elaboración propia]

En la **Tabla 12** se puede observar cómo varió la rugosidad de la superficie de las muestras tras su exposición a HCl 1M, con y sin la presencia del extracto de *Ganoderma lucidum*. Es evidente que la corrosión en medio ácido provoca un deterioro significativo de la rugosidad de la superficie, aumentando notablemente su rugosidad en ausencia de inhibidor. El comportamiento del extracto sugiere que a mayor concentración, mayor es la capacidad de reducir el deterioro de la superficie, sin evitarlo completamente. Esto indica que el extracto de *Ganoderma lucidum* contribuye a la reducción del ataque por corrosión y disminuye la agresividad del medio ácido, pero no impide por completo la corrosión.

5.4.3. Infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR)

A continuación, se presentan los espectros resultantes del análisis por medio de FTIR para el extracto de *Ganoderma Lucidum* puro (**Figura 33**) con el fin de identificar sus principales grupos funcionales, y el del extracto después de haberse disuelto en HCl 1M (**Figura 34**). El espectro FTIR del extracto de *Ganoderma lucidum* muestra la presencia de compuestos que pueden desempeñar un papel importante en la inhibición de la corrosión.

Uno de los picos más notorios se encuentra en 3250 cm^{-1} , lo que sugiere la presencia de grupos hidroxilo (-OH) presentes en polifenoles y polisacáridos, promoviendo la formación de una película protectora que reduce el contacto con agentes corrosivos[69]. En la región de 2928 cm^{-1} y 2852 cm^{-1} , se observan bandas características de vibraciones C-H, indicando la presencia de lípidos o triterpenos; aunque estos no son inhibidores directos de corrosión, su estructura permite la formación de una barrera hidrofóbica en la superficie, disminuyendo la penetración de especies corrosivas [70]. Por otro lado, el pico en 1710 cm^{-1} sugiere la presencia de grupos carbonilo (C=O),

los cuales se asocian a ácidos carboxílicos, cetonas, aldehídos, ésteres y amidas, compuestos que pueden mejorar la adsorción del extracto en el metal y propiciando la formación de una capa protectora, participando en mecanismos de protección frente a la oxidación [69].

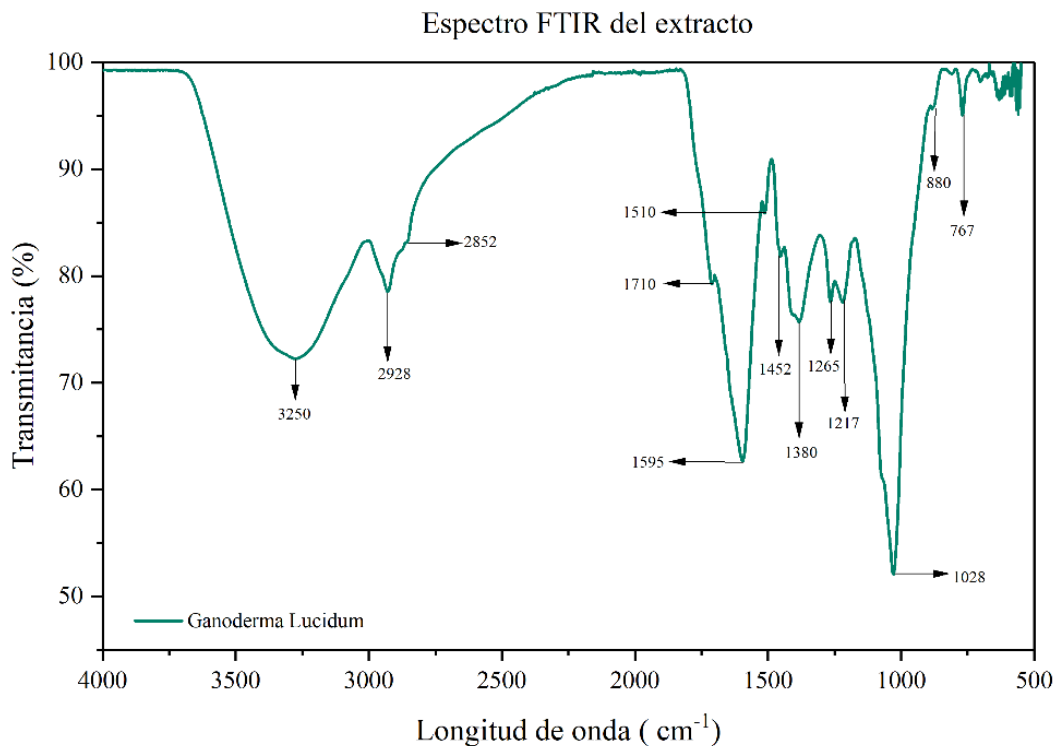


Figura 33. Espectro de FTIR del extracto puro con sus picos identificados.

Fuente: [Elaboración propia]

Adicionalmente, los picos en 1595 cm^{-1} y 1510 cm^{-1} indican la presencia de flavonoides, polifenoles, amidas, compuestos que cuentan con la capacidad de interactuar con la superficie metálica[71]. En la región de 1265 cm^{-1} y 1217 cm^{-1} , se identifican bandas correspondientes a enlaces C-O en fenoles o ésteres, lo que refuerza la hipótesis de que el extracto contiene sustancias capaces de estabilizar la película protectora [69]. Por otro lado, 1380 cm^{-1} se observan picos relacionados con vibraciones C-H, lo cual se relaciona a flavonoides y compuestos fenólicos, mientras que el de 1028 cm^{-1} se asocia con enlaces C-O-C en polisacáridos o glicósidos, los cuales pueden promover la formación de una barrera protectora en la superficie del metal, minimizando el ataque corrosivo [69]. Por último, las bandas en 880 cm^{-1} y 767 cm^{-1} confirman la presencia de anillos aromáticos, lo que refuerza la idea de que el extracto de *Ganoderma lucidum* contiene

flavonoides y fenoles con potencial antioxidante y protector contra la corrosión [70]. En la **Tabla 13** se observa el análisis detallado de los picos presentes en el espectro FTIR, en el **Apéndice 8** se encuentra la tabla con todas las longitudes de onda analizadas. Es importante resaltar, que los espectros FTIR obtenidos cuentan con gran similitud a el espectro mostrado en la **Figura 1**.

Tabla 13. Principales longitudes de onda analizadas a partir del espectro FTIR.

Pico (cm⁻¹)	Rango típico (cm⁻¹)	Grupo funcional	Importancia	Compuestos asociados
3250	3200 – 3600	O–H (alcoholes /fenoles)	Forma enlaces de hidrógeno y genera adsorción.	Polifenoles, polisacáridos
1710	1690 – 1750	C=O (carbonilo)	Interacción química con el metal	Ácidos orgánicos, cetonas y esteres
1595 / 1510	1580 – 1650 1500 – 1600	C=C aromático N–H (amidas)	Interacciones con la superficie metálica	Fenoles, proteínas, amidas
1265 / 1217	1200 – 1350 1200 – 1300	C–O / C–N (ésteres/alcoholes /alcaloides)	Adsorción y enlaces de hidrógeno	Fenoles, éteres y esteres.
1028	1000 – 1100	C–O–C (éteres/ polisacáridos)	Forma películas sobre la superficie	polisacáridos

Adaptado de: [29], [30], [72], [73]

Por lo tanto, estos resultados sugieren que este extracto posee propiedades que pueden contribuir a la inhibición de la corrosión mediante dos mecanismos principales. Primero, la adsorción de polifenoles, flavonoides, ácidos carboxílicos y quinonas en la superficie metálica, lo que favorece la formación de una película protectora[25], [53]. Segundo, la acción antioxidante de estos compuestos, que ayuda a reducir la velocidad de las reacciones de oxidación y minimiza la degradación del metal. Además, la presencia de polisacáridos y lípidos en el extracto puede aportar a la formación de una barrera física que impida la penetración de especies agresivas como el

oxígeno e hidrogeno en la solución [25]. Cuando se comparan los espectros de FTIR (**Figura 34**), se perciben cambios en los picos característicos, los cuales indican que el extracto no se queda simplemente flotando en la solución con HCl 1M, sino que reacciona con el medio ácido, cambiando su espectro y probablemente interactúa con la superficie metálica de las muestras. A partir de esto, es posible asegurar que el extracto de *Ganoderma Lucidum* trabaja por medio de la adsorción, generando una capa protectora que se observó anteriormente por medio de SEM.

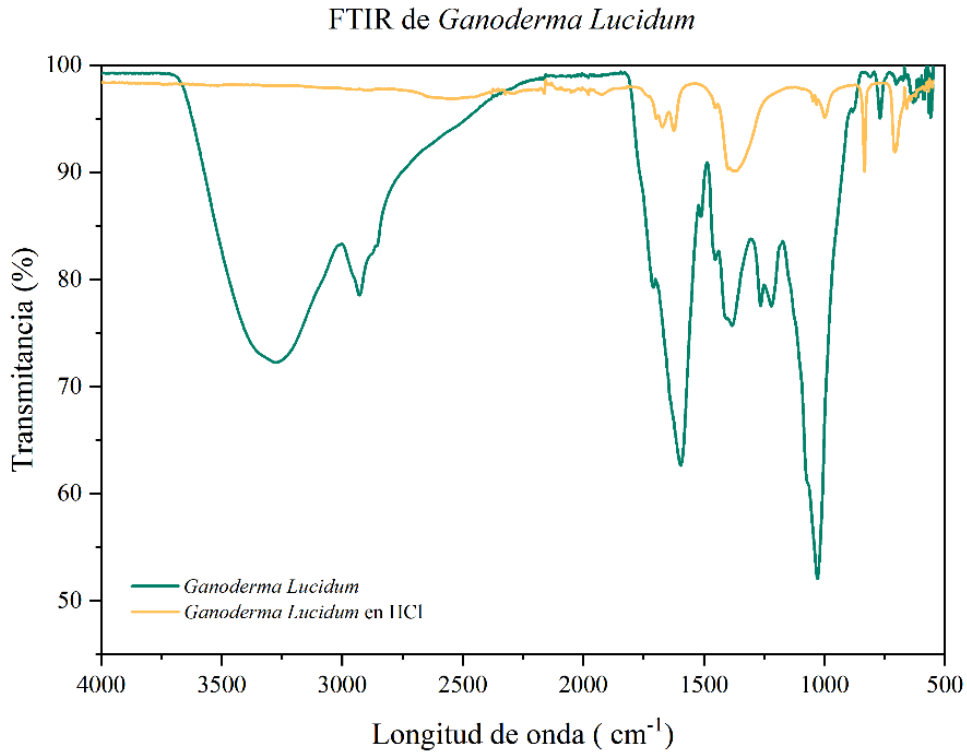


Figura 34. Comparación de los espectros de FTIR del extracto de *Ganoderma Lucidum* puro respecto el extracto disuelto en HCl 1M.

Fuente: [Elaboración propia]

6. CONCLUSIONES

Tras los intentos de disolver el extracto de *Justicia Tinctoria* en HCl 1M y NaCl 0.6M, se observó que este era insoluble en su mayoría, formando mezclas heterogéneas con presencia de grandes partículas, lo que impidió su uso tanto en ensayos gravimétricos como electroquímicos, ya que no era posible garantizar una aplicación homogénea y repetibilidad en las pruebas. Como resultado, el extracto de *Justicia Tinctoria* no pudo ser evaluado.

En medio neutro (NaCl 0.6M), el extracto de *Ganoderma Lucidum* no mostró un efecto inhibitor significativo y, en su lugar, se observó un incremento en la velocidad de corrosión en comparación con las muestras sin inhibidor, sugiriendo que el comportamiento del extracto depende de la química del electrolito y la solubilidad de los compuestos activos. Adicionalmente, se considera que la formación de precipitados en las disoluciones con NaCl podría haber reducido su eficacia, indicando que el extracto de *Ganoderma Lucidum* no es adecuado como inhibidor de corrosión en medios neutros sin modificaciones en su formulación o métodos de aplicación.

Se confirmó que el extracto de *Ganoderma Lucidum* presenta propiedades inhibitoras de corrosión en medio ácido (HCl 1M), logrando una eficiencia de inhibición del 95.4% en ensayos gravimétricos y del 90.07% en ensayos electroquímicos, indicando que el extracto tiene un alto potencial como inhibidor de corrosión verde, ofreciendo una alternativa más sostenible y menos tóxica en comparación con los inhibidores sintéticos utilizados tradicionalmente.

Los ensayos de espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) evidenciaron que el extracto forma una barrera protectora sobre la superficie, reduciendo la capacitancia de doble capa y aumentando la resistencia a la polarización; sugiriendo que los compuestos del extracto interactúan con la superficie metálica a través de un mecanismo de adsorción, modificando la cinética de corrosión y acero de bajo carbono cuando se incorporó el extracto en medio ácido. En contraste con las muestras sin inhibidor, las cuales mostraron claros signos de corrosión, las muestras con el extracto presentaron menos productos de corrosión y una morfología superficial menos afectada; confirmando que el extracto de *Ganoderma Lucidum* actúa como barrera protectora.

La evaluación de las isotermas de adsorción indicó que el modelo que mejor describe el comportamiento del extracto es el de Temkin, lo que sugiere una adsorción no ideal con interacciones moleculares dentro de la película formada sobre la superficie metálica. La presencia de interacciones atractivas o repulsivas entre las moléculas adsorbidas podría explicar la variabilidad en la eficiencia del inhibidor según la concentración utilizada.

El extracto de *Ganoderma Lucidum* presentó propiedades de inhibidoras de corrosión prometedoras en medio ácido. Si bien su eficiencia continúa siendo inferior a la de algunos inhibidores sintéticos comerciales, su naturaleza biodegradable y baja toxicidad, lo colocan como un competidor prometedor siendo una opción menos agresiva con el medio ambiente.

7. RECOMENDACIONES

Optimización del proceso de extracción del extracto de *Justicia Tinctoria* con el objetivo de lograr una mayor solubilidad y facilitar su aplicación en estudios de inhibición de corrosión. Esto podría incluir la evaluación de diferentes solventes, métodos de extracción asistidos por ultrasonido o técnicas de fraccionamiento de los compuestos activos.

Aumentar los análisis electroquímicos utilizando *Ganoderma lucidum* en medio ácido, aplicando variaciones en la temperatura y el tiempo de exposición para determinar el efecto de estos factores en la estabilidad del inhibidor y su efectividad a largo plazo.

Análisis de espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) mediante simulaciones de circuitos equivalentes con softwares como ZView, PyEIS, entre otros, para validar la formación de la barrera protectora y la interacción de los compuestos del extracto con la superficie metálica, lo cual permitirá comprender mejor los mecanismos de inhibición.

Profundizar en análisis de composición, como cromatografía de gases o cromatografía líquida de alta resolución (HPLC), para identificar los compuestos bioactivos responsables de la inhibición de corrosión de *Ganoderma Lucidum* y evaluar su estabilidad en diferentes condiciones.

Aumentar la cantidad de pruebas experimentales, con el fin de aumentar la cantidad de datos disponibles, reduciendo así la variabilidad entre los resultados y permitiendo un análisis estadístico más robusto que brinde mayor certeza sobre la eficacia del inhibidor en diferentes condiciones.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] ESC Steel LLC, “Contribución Económica de La Protección Catódica Contra La Corrosión”, <https://www.escsteel.com/post/contribuci%C3%B3n-econ%C3%B3mica-de-la-protecci%C3%B3n-cat%C3%B3dica-contra-la-corrosion>. Consultado: el 1 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.escsteel.com/post/contribuci%C3%B3n-econ%C3%B3mica-de-la-protecci%C3%B3n-cat%C3%B3dica-contra-la-corrosion>
- [2] Naciones Unidas, “Estudio Económico de América Latina y el Caribe 2021”, 2021. [En línea]. Disponible en: www.cepal.org/apps
- [3] J. A. Salazar-Jiménez, “Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales (Nota técnica)”, *Tecnología en Marcha*, vol. 28, núm. 3, pp. 127–136, 2015.
- [4] F. J. Pancorbo Floristán, *Corrosión, degradación y envejecimiento de los materiales empleados en la edificación*. . Barcelona, Spain: MARCOMBO, 2011.
- [5] E. Navarrete Cueva, “CORROSIÓN Y DEGRADACIÓN DE LOS METALES”, 2007, *Escuela Politécnica Nacional , Quito, Ecuador*.
- [6] The European Stainless Steel Development Association, “Decapado y Pasivado del acero inoxidable Serie Materiales y sus Aplicaciones”. [En línea]. Disponible en: www.outokumpu.com/stainless
- [7] L. Garita Arce, L. Rivolta Carvallo, y M. Vega León, “EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN POR PICADURA EN ALEACIONES DE ALUMINIO”, *Revista Ingeniería*, vol. 23, núm. 1, ago. 2013, doi: 10.15517/ring.v23i1.11690.

- [8] R. Jimenez-Salas, R. Brenes-Brenes, J. Rodríguez-Yañéz, y J. Sanabria-Chinchilla, “Corrosión atmosférica del acero al bajo carbono, a diferentes ángulos de exposición, en un ambiente tropical”, *Revista Tecnología en Marcha*, dic. 2022, doi: 10.18845/tm.v36i1.5845.
- [9] U. Evans, “Oxygen distribution as a factor in the corrosion of metals”, *Ind Eng Chem*, vol. 17, núm. 4, pp. 363–372, abr. 1925, doi: 10.1021/ie50184a012.
- [10] J. Martínez Gutiérrez, E. M. Lluveras Pérez, y R. Marrero Águila, “Comportamiento de la rugosidad superficial del acero luego de exposición natural en exterior e interior”, *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, vol. 22, núm. 1, jun. 2019, doi: 10.31910/rudca.v22.n1.2019.1193.
- [11] E. Silveira, M. Juan, M. Insausti, y I. Aldabaldetrekú, “INFLUENCIA DEL ACABADO SUPERFICIAL TRAS UN PROCESO DE TORNEADO EN LA RESISTENCIA A LA CORROSIÓN POR PICADURAS DE ACEROS INOXIDABLES DÚPLEX”, Españaa. [En línea]. Disponible en: www.sociemat.es/Material-ES
- [12] U. Silva León, “PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN DEL ACERO INOXIDABLE 304 A BASE DE RECUBRIMIENTOS DE POLI(3-OCTILTIOFENO)”, Centro de investigación en materiales avanzados, S.C, Chihuahua, 2010. Consultado: el 13 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/506/1/Tesis%20Ulises%20Le%C3%B3n%20Silva.pdf>
- [13] R. Travieso Domuso y J. J. Pineda Delgado, “Preparación de superficies, protección anticorrosión y mantenimiento de estructuras navales”, *Universidad de Cádiz: Proyectoss de fin de carrera de ingeniería técnica naval*, pp. 174–188, jul. 2011, Consultado: el 13 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://rodin.uca.es/handle/10498/15173>

- [14] F. Martínez-Pérez, “Corrosion. Types. Prevention”, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 32, núm. 2, 2023, [En línea]. Disponible en: <https://cu-id.com/2177/v32n2e10>
- [15] S. Díaz Camacho y D. De León Escobedo, “ESTIMACIÓN DEL IMPACTO DEL TIEMPO DE CORROSIÓN EN LA EVOLUCIÓN DEL RIESGO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO”, 2012, *Universidad Autónoma del Estado de México, Estado de México*.
- [16] A. J. Betts y L. H. Boulton, “Crevice corrosion: Review of mechanisms, modelling, and mitigation”, <https://doi.org/10.1179/000705993799156299>, vol. 28, núm. 4, pp. 279–295, ene. 1993, doi: 10.1179/000705993799156299.
- [17] M. A. Gonzalez Duarte y A. J. S. Copete Daza, “EFECTO DE DIFERENTES PORCENTAJES DE DEFORMACION SOBRE UN ACERO CON CONTENIDO DE CARBONO MENOR AL 0,2% Y MANGANESO MAYOR AL 1,0%”, UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS, Bogotá, 2018. Consultado: el 26 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repository.udistrital.edu.co/server/api/core/bitstreams/21189dde-d58d-48f8-bf01-92284e07df8b/content>
- [18] J. F. Correal Rueda, “PROPUESTA PARA LA ELABORACIÓN DE UN INHIBIDOR DE CORROSIÓN A PARTIR DE LA BORRA DE CAFÉ PARA SU APROVECHAMIENTO A NIVEL INDUSTRIAL”, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia, 2022.
- [19] M. Donadio, J. Capacho, y L. Santander, “Total Corrosion Management. Documentary analysis”, *Revista Alconpat*, vol. 13, núm. 2, pp. 235–253, 2023, doi: 10.21041/ra.v13i2.690.

- [20] L. P. Tejeda Benítez, P. J. Meza Castellar, E. D. Altamiranda Percy, y M. J. Berrocal Bravo, “Plant extracts used as corrosion inhibitors”, 2014.
- [21] L. P. Tejeda Benítez, P. J. Meza Castellar, E. D. Altamiranda Percy, y M. J. Berrocal Bravo, “Plant extracts used as corrosion inhibitors”, 2014.
- [22] ASTM International, “ASTM G102-23 Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements”, *ASTM International*, 2023, doi: 10.1520/G0102-23.
- [23] ASTM International, “ASTM G3-21 Standard Guide for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals”, *ASTM International*, 2021, doi: 10.1520/G0031-21.
- [24] L. García Bacallao, L. V. García Gómez, D. M. Rojo Domínguez, y E. Sánchez García, “Plantas con propiedades antioxidantes”, *Rev Cubana Invest Biomed*, vol. 20, núm. 3, pp. 231–236, 2001.
- [25] A. T. Ortega-Ramírez, L. V. Barrantes-Sandoval, B. D. Casallas-Martin, y N. Cortés-Salazar, “Application of green inhibitors for corrosion control in metals. Review”, *DYNA (Colombia)*, vol. 88, núm. 217, pp. 160–168, abr. 2021, doi: 10.15446/dyna.v88n217.93871.
- [26] Mundo Forestal, “Azul de mata - Justicia tinctoria - Arbusto medicinal - MundoForestal”. Consultado: el 17 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.elmundoforestal.com/portfolio/azul-de-mata/>
- [27] C. A. Solís, V. Jiménez, y J. Arias, “PROPAGACIÓN ASEXUAL DE AZUL DE MATA (Justicia tinctoria (OERST.) DN Gibson FAM Acanthaceae Por Medio de Estacas”, San José, 2015. [En línea]. Disponible en: www.mag.go.cr/revagr/index.htmlwww.cia.ucr.ac.cr

- [28] N. Fernández, R. Gaggino, J. Kreiker, y M. J. Positieri, “Desarrollo Tecnológico de Paneles Multicapa a partir de Residuos Lignocelulósicos Bioligados con Micelio de Hongos.”, *AJEA*, núm. 4, oct. 2019, doi: 10.33414/ajea.4.370.2019.
- [29] R. Suarez, I. T. Salgado, y J. G. Gonzalez-Rodriguez, “Ganoderma lucidum Extract as Corrosion Inhibitor for Carbon Steel in H₂SO₄”, 2014. [En línea]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/332332984>
- [30] E. Cadar *et al.*, “Natural Bio-Compounds from Ganoderma lucidum and Their Beneficial Biological Actions for Anticancer Application: A Review”, el 1 de noviembre de 2023, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/antiox12111907.
- [31] L. S. Barreto, T. F. de Almeida, A. de M. Santos, M. S. Tokumoto, F. Cotting, y V. R. Capelossi, “Evaluation of vegetables residues as corrosion inhibitors”, *Research, Society and Development*, vol. 10, núm. 8, p. e28710817409, jul. 2021, doi: 10.33448/rsd-v10i8.17409.
- [32] A. E. Ali, G. E. Badr, y A. E. A. S. Fouda, “Citrus sinensis extract as a green inhibitor for the corrosion of carbon steel in sulphuric acid solution”, *Biointerface Res Appl Chem*, vol. 11, núm. 6, pp. 14007–14020, 2021, doi: 10.33263/BRIAC116.1400714020.
- [33] C. Byrne, M. Ramírez, E. Di Santo, N. Cristiano, y O. D’Alessandro, “Extracto acuoso de romero como inhibidor de la corrosión del acero SAE1010 en NaCl 0,1 M”, *Jornadas sobre Tecnología de Recubrimientos*, abr. 2020.
- [34] ASTM International, “ASTM G1-03 Standard Practice for Preparing, Cleaning and Evaluating Corrosion Test Specimens”, *ASTM International*, 2017.

- [35] ASTM International, “ASTM G31 Standard Guide for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals”. Consultado: el 6 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.astm.org/g0031-21.html>
- [36] C. Prieto *et al.*, “Study of corrosion by Dynamic Gravimetric Analysis (DGA) methodology. Influence of chloride content in solar salt”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 157, pp. 526–532, dic. 2016, doi: 10.1016/J.SOLMAT.2016.07.027.
- [37] F. Zinola, *ELECTROQUÍMICA FUNDAMENTAL Y APLICACIONES*, vol. segunda edición. Montevideo Uruguay, 2007. Consultado: el 25 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: https://eva.fcien.udelar.edu.uy/pluginfile.php/51794/mod_resource/content/1/Electroqu%C3%ADmica%20Fundamental%20y%20Aplicaciones%20LIBRO.pdf
- [38] M. Franco, H. Herrera-Hernández, I. García-Orozco, y P. Herrasti, “Extracto acuoso natural de Morinda Citrifolia como inhibidor de corrosión del acero AISI-1045 en ambientes ácidos de HCl”, *Revista de Metalurgia*. Consultado: el 23 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/view/1443/1720?utm_source=chatgpt.com
- [39] J. A. S. Roberts y R. M. Bullock, “Direct determination of equilibrium potentials for hydrogen oxidation/production by open circuit potential measurements in acetonitrile”, *Inorg Chem*, vol. 52, núm. 7, pp. 3823–3835, abr. 2013, doi: 10.1021/ic302461q.
- [40] H. Herrera Hernández *et al.*, “Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS): A Review Study of Basic Aspects of the Corrosion Mechanism Applied to Steels”, en *Electrochemical Impedance Spectroscopy*, IntechOpen, 2020. doi: 10.5772/intechopen.94470.

- [41] Gamry Instruments, “Electrochemical Impedance Spectroscopy”.
- [42] R. Cottis y S. Turgoose, *Electrochemical Impedance and Noise*. Houston, TX: NACE International, 1999.
- [43] A. Valbon, M. A. Neves, y A. Echevarria, “Anticorrosive Effect of PVP 40000 Against AISI 1020 Carbon Steel in HCl”, *Materials Research*, vol. 21, núm. 6, oct. 2018, doi: 10.1590/1980-5373-mr-2017-0847.
- [44] M. Criado, S. Fajardo, B. Valdez, y J. M. Bastidas, “Aspectos cinéticos de la corrosión y fenómenos de pasividad.”, en *orrosión y preservación de la infraestructura industrial.*, Barcelona, España: OmniaScience , 2013, 1. doi: 10.3926/oms.141.
- [45] “Inhibidores naturales en el control de la corrosión de materiales metálicos”. Consultado: el 24 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://inventio.uaem.mx/index.php/inventio/article/download/252/303?inline=1>
- [46] “Determinación de la velocidad de corrosión con INTELLO | Metrohm”. Consultado: el 27 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.metrohm.com/es_es/applications/application-notes/autolab-applikationen-anautolab/an-cor-019.html?utm_source=chatgpt.com
- [47] Y. Meas y J. Genesca, “Tres métodos para evaluar una velocidad de corrosión”, 1991. [En línea]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/331907188>
- [48] T. A. Saleh, “Adsorption technology and surface science”, *Interface Science and Technology*, vol. 34, pp. 39–64, ene. 2022, doi: 10.1016/B978-0-12-849876-7.00006-3.
- [49] S. Domínguez-Domínguez, A. Domínguez-López, A. González-Huerta, y S. Navarro-Galindo, “CINÉTICA DE INHIBICIÓN E ISOTERMAS DE ADSORCIÓN DE HUMEDAD DE LA SEMILLA DE JAMAICA (*Hibiscus sabdariffa* L.) IMBIBITION

KINETICS AND MOISTURE SORPTION ISOTHERMS OF ROSELLE SEEDS (Hibiscus sabdariffa L.)”, *Rev Mex Ing Quim*, vol. 6, núm. 3, pp. 309–316, 2007, Consultado: el 5 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-27382007000300011&lng=es&nrm=iso&tlng=es

- [50] S. Hernández, “ESTUDIO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE LA ADSORCIÓN Y REDUCCIÓN CATALÍTICA DE SO₂ SOBRE Cr₂O₃/Al₂O₃ EN PRESENCIA DE CH₄ Y O₂ A ALTAS TEMPERATURAS”, Universidad Nacional de la Plata, Argentina, 2016. Consultado: el 5 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/224096/CONICET_Digital_Nro.e86ebc40-f512-4990-8234-b82c64afc7cc_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- [51] C. A. Adah, S. O. Adejo, J. A. Gbertyo, y A. A. Ogwuche, “ Comparative studies of inhibitive properties of Ficus polita and Ficus platyphylla on corrosion inhibition of mild steel in acidic medium ”, *Ovidius University Annals of Chemistry*, vol. 32, núm. 1, pp. 40–45, ene. 2021, doi: 10.2478/auoc-2021-0006.
- [52] C. A. Murillo Martínez, O. A. Gómez Rodríguez, O. P. Ortiz Cancino, y S. F. Muñoz navarro, “APLICACIÓN DE MODELOS PARA LA GENERACIÓN DE LA ISOTERMA DE ADSORCIÓN DE METANO EN UNA MUESTRA DE SHALE Y SU IMPACTO EN EL CÁLCULO DE RESERVAS”, *Revista Fuentes el Reventón Energético*, vol. 13, núm. 2, pp. 131–140, jul. 2015, doi: 10.18273/revfue.v13n2-2015012.
- [53] V. S. Sastri, *GREEN CORROSION INHIBITORS: Theory and Practice*. Canada: John Wiley & Sons, Inc., 2011. Consultado: el 5 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en:

https://dl.iran-mavad.com/pdf95/Green%20Corrosion%20Inhibitors_iran-mavad.com.pdf#page=13.00

- [54] J. O. Cross, R. L. Opila, I. W. Boyd, y E. N. Kaufmann, “Materials characterization and the evolution of materials”, *MRS Bull*, vol. 40, núm. 12, pp. 1019–1033, nov. 2015, doi: 10.1557/mrs.2015.271.
- [55] ASTM Inteernaational, “E3-11 Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens”, 2017, doi: 10.1520/E0003-11R17.
- [56] ASTM International, “ASTM E 407-99: Standard Practice for Microetching Metals and Alloys 1”. [En línea]. Disponible en: www.astm.org
- [57] E. Alfonso, A. Marinez-Gomez, P. Tiemblo, y N. Garcia, “La perfilometría óptica como técnica de caracterización topográfica no destructiva y sin contacto.”, *Revista de plásticos modernos*, vol. 120, núm. 758, jun. 2020.
- [58] C. R. Bryan, “Analysis of Corrosion Residues Collected from the Aluminum Basket Rails of the High-Burnup Demonstration Cask”, mar. 2017. doi: <https://doi.org/10.2172/1346335>.
- [59] “Hitachi S-4800 Field Emission Scanning Electron Microscope | Holonyak Micro & Nanotechnology Lab | University of Illinois Urbana - Champaign”. Consultado: el 1 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://hmntl.illinois.edu/facilities/cleanrooms/equipment/hitachi4800>
- [60] J. J. Camejo y J. A. Domínguez, “Métodos químico-tecnológicos de protección contra la corrosión”, 2015, Consultado: el 22 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Juan-Camejo-Giniebra/publication/323176272_Metodos_quimico-

tecnologicos_de_proteccion_contra_la_corrosion/links/5a88be28a6fdcc6b1a3f8889/Metodos-quimico-tecnologicos-de-proteccion-contra-la-corrosion.pdf

- [61] L. Á. Olivia Conde, “ESTUDIO COMPARATIVO SOBRE LA RESISTENCIA A LA CORROSIÓN EN ACEROS INOXIDABLES UTILIZADOS EN INTERCAMBIADORES DE CALOR”, Universidad de Ingeniería y Tecnología, 2021. Consultado: el 22 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.utec.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12815/264/Oliva%20Conde_Tesis.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- [62] A. S. Fouda, S. M. Rashwan, M. M. Darwish, y N. M. Arman, “Corrosion inhibition of Zn in a 0.5 M HCL solution by Ailanthus altissima extract”, *Portugaliae Electrochimica Acta*, vol. 36, núm. 5, pp. 309–323, jul. 2018, doi: 10.4152/PEA.201805309.
- [63] A. Popova, M. Christov, y A. Zwetanova, “Effect of the molecular structure on the inhibitor properties of azoles on mild steel corrosion in 1 M hydrochloric acid”, *Corros Sci*, vol. 49, núm. 5, pp. 2131–2143, may 2007, doi: 10.1016/J.CORSCI.2006.10.021.
- [64] A. J. Bard, L. R. Faulkner, y H. S. White, *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications*, 3rd ed. New Jearsey: WILEY, 2022.
- [65] L. B. Furtado *et al.*, “Effects of temperature, concentration and synergism on green Schiff bases synthesized from vanillin in applications as corrosion inhibitors for carbon steel in well stimulation”, *J Pet Sci Eng*, vol. 213, p. 110401, jun. 2022, doi: 10.1016/J.PETROL.2022.110401.
- [66] N. O. Eddy, F. Awe, y E. E. Ebenso, “Adsorption and inhibitive properties of ethanol extracts of leaves of Solanum melongena for the corrosion of mild steel in 0.1 M HCl”, *Int*

- J Electrochem Sci*, vol. 5, núm. 12, pp. 1996–2011, dic. 2010, doi: 10.1016/s1452-3981(23)15401-0.
- [67] A. Popova, M. Christov, S. Raicheva, y E. Sokolova, “Adsorption and inhibitive properties of benzimidazole derivatives in acid mild steel corrosion. *Corrosion Science*, 46(6), 1333–1350 | 10.1016/j.corsci.2003.09.025”, *Corrosion Science ELSEVIER*, vol. 46, núm. 1333–1350, may 2003, Consultado: el 28 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://sci-hub.se/https://doi.org/10.1016/j.corsci.2003.09.025>
- [68] S. Obaike Adejo, T. Uzah, y J. Akuhwa, “Adsorption Isotherm Modeling in Corrosion Inhibition Studies”, en *Corrosion Engineering - Recent Breakthroughs and Innovative Solutions*, IntechOpen, 2024. doi: 10.5772/intechopen.1005211.
- [69] Universidad de Granada, “Tablas de Espectroscopía”, 2002, *Universidad de granada*. Consultado: el 5 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.ugr.es/~quiorred/lab/tablas_espec/ir.htm
- [70] L. A. Domínguez-Pérez, L. M. L. Lagunes-Gálvez, J. Barajas-Fernández, M. de los Á. Olán-Acosta, R. García-Alamilla, y P. García-Alamilla, “Caracterización vibracional de grupos funcionales en granos de cacao durante el tostado usando espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier”, *Acta Universitaria. Multidisciplinary Scientific Journal*, oct. 2019, Consultado: el 5 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://doi.org/10.15174/au.2019.2172>
- [71] Aminas formadoras de película y sus aplicaciones en la industria de las centrales eléctricas - AquaPhoenix”. Consultado: el 6 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.aquaphoenixsci.com/aminas-formadoras-de-pelicula-y-sus-aplicaciones-en-la-industria-de-las-centrales-electricas/>

- [72] B. Sangeetha, A. S. Krishnamoorthy, D. Amirtham, D. J. Sundara Sharmila, P. Renukadevi, y V. G. Malathi, “FT-IR Spectroscopic Characteristics of Ganoderma lucidum Secondary Metabolites”, *Current Journal of Applied Science and Technology*, pp. 1–8, ene. 2020, doi: 10.9734/cjast/2019/v38i630453.
- [73] B. Sangeetha, A. S. Krishnamoorthy, D. Amirtham, D. J. Sundara Sharmila, P. Renukadevi, y V. G. Malathi, “FT-IR Spectroscopic Characteristics of Ganoderma lucidum Secondary Metabolites”, *Current Journal of Applied Science and Technology*, pp. 1–8, ene. 2020, doi: 10.9734/cjast/2019/v38i630453.

9. APÉNDICES

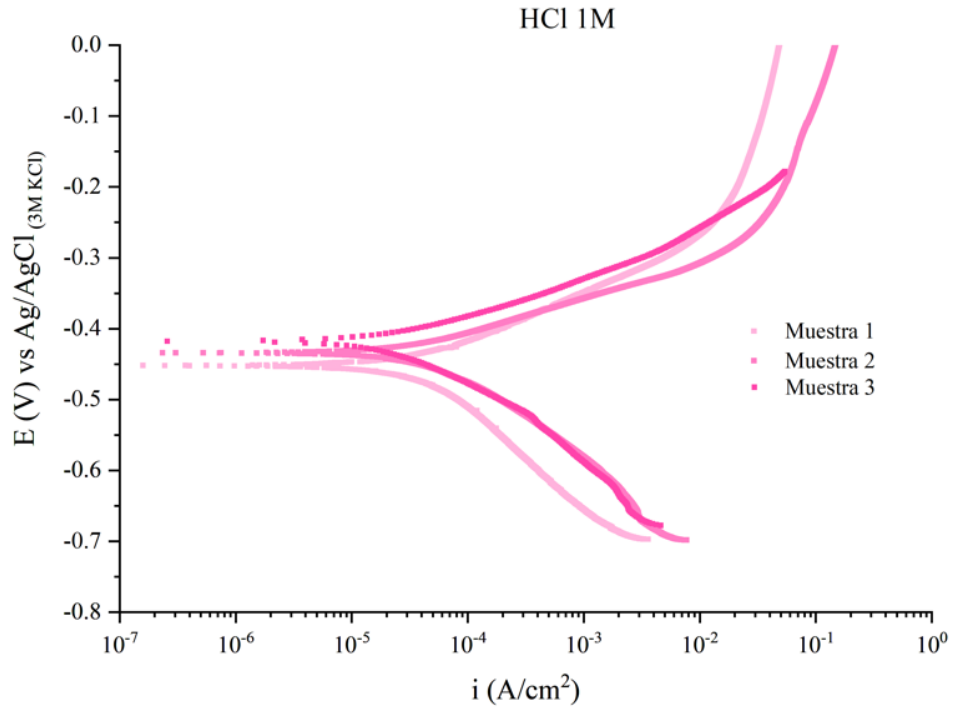
Apéndice 1. Preparación del decapado a base de Urotropina.

Para preparar 1 litro de solución de decapado:

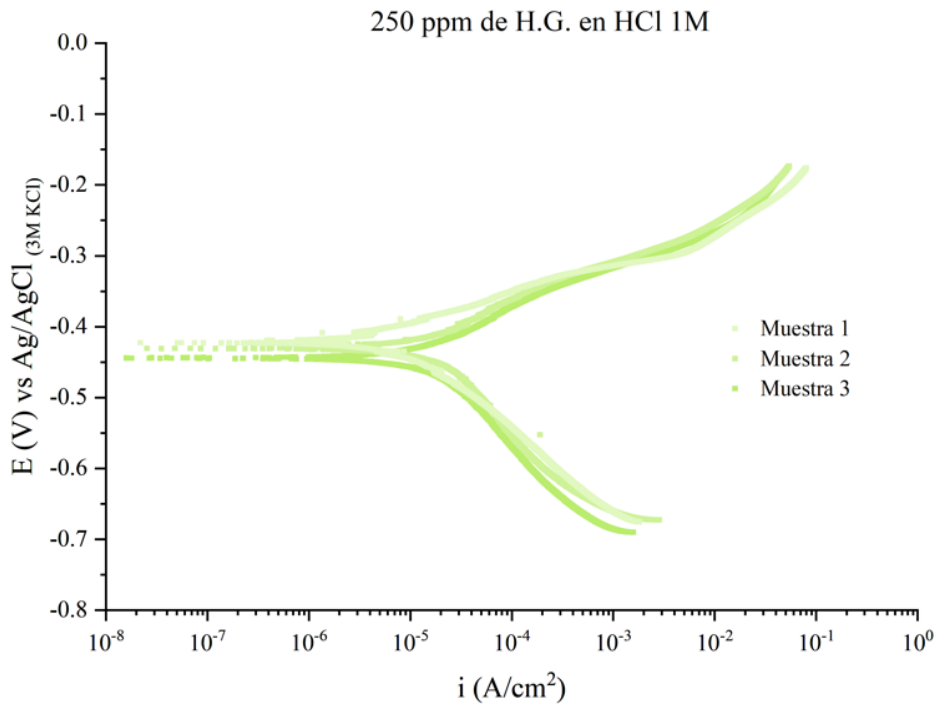
En 500 mL de agua destilada se disuelven sin agitar 3.5 g de urotropina, esta disolución se calienta. Luego, en un balón aforado de 1 Litro, se agregan 500 mL de HCl (37%). Poco a poco se agrega la disolución de urotropina al balón aforado con HCl. En caso de ser necesario, se puede remover la urotropina con una espátula de plástico. Una vez que se mezcló en su totalidad la disolución de urotropina con el HCl, se agita el balón aforado. Por último, se deja enfriar y una vez frío, se trasvasa a un envase donde se va a almacenar.

Apéndice 2. Curvas de polarización triplicadas por concentración. Fuente: [Elaboración propia]

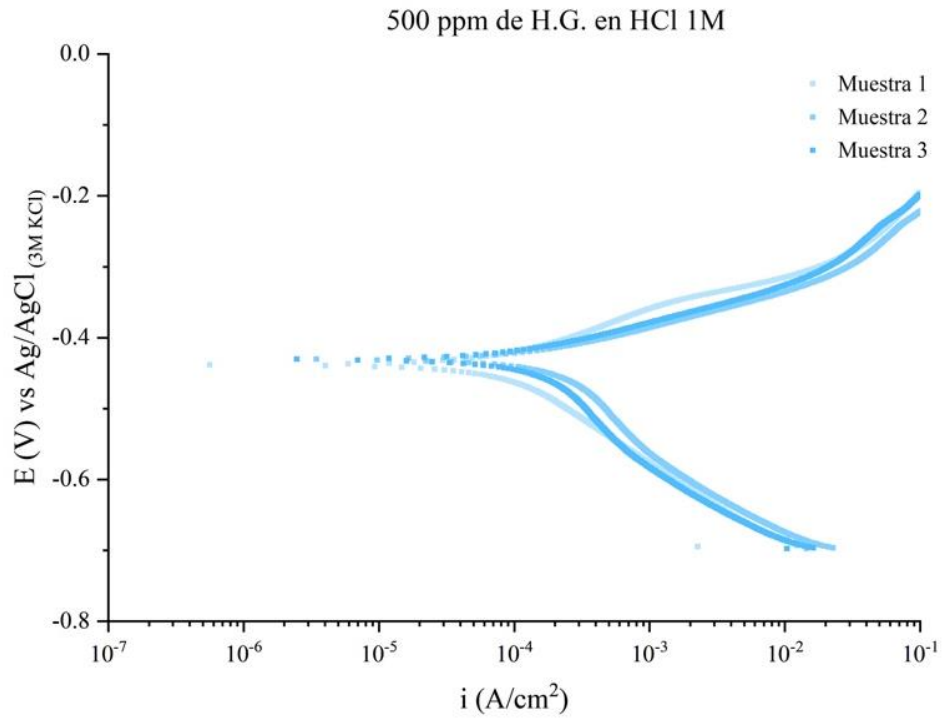
(a)



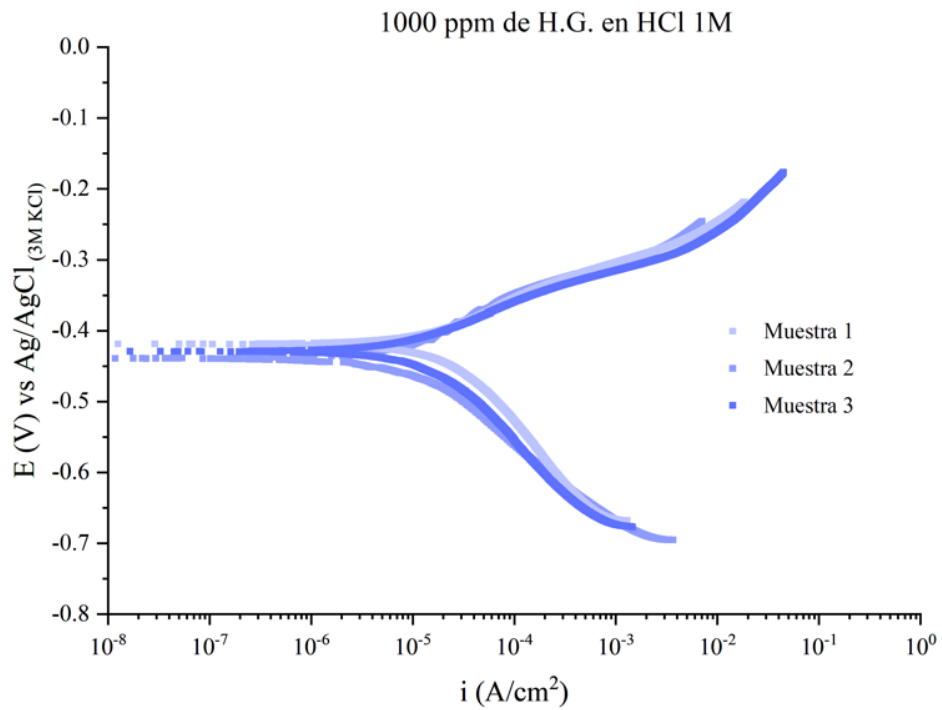
(b)



(c)



(d)



Apéndice 3. Resultados de Tafel a partir de las curvas de polarización.

Fuente: [Elaboración propia]

Tabla 14. Resultados de las pendientes de Tafel de los triplicados para cada concentración de Ganoderma Lucidum.

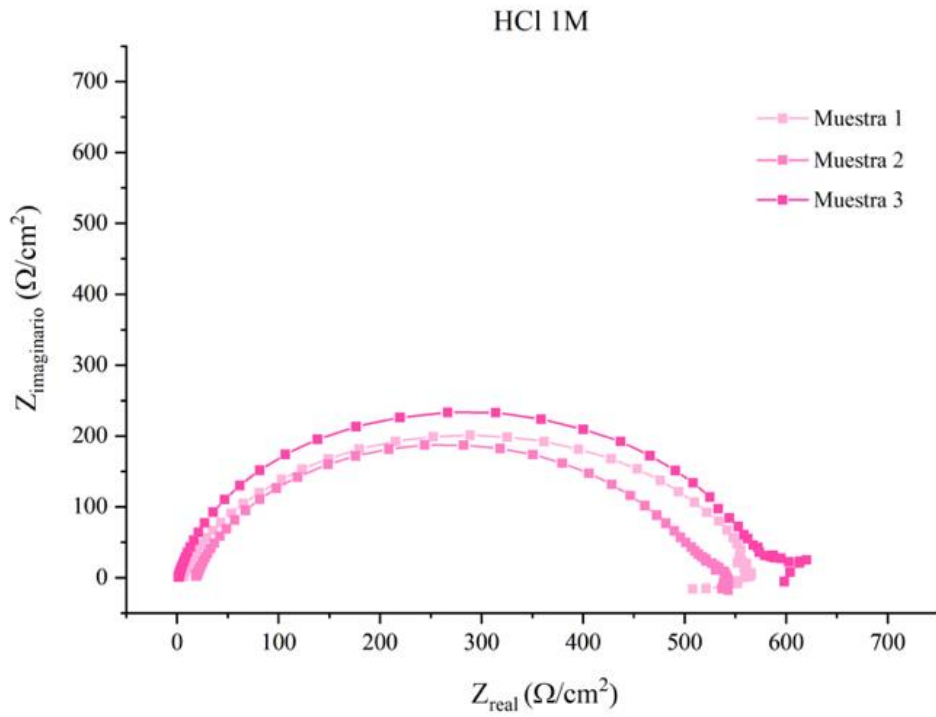
Concentración (ppm)	Muestra	E_{corr} (mV)	o.o anodica	o.o catodica	ba (mV)	bc (mV)	I corr ($\mu A/cm^2$)	Corrosion Rate (mm/yr)
250	M1	-422.487	-207,16	-1048,65	34,82	126,43	6,0	0,09
	M2	-430.593	-161	-1262,59	44,5	169,38	7,1	0,11
	M3	-422.98	-201,35	-1194,99	35,26	155,07	6,0	0,09
500	M1	-405,027	-123,1	-1280,22	57,51	186,83	18,4	0,28
	M2	-401,278	-187,85	-861,27	43,67	99,37	19,6	0,29
	M3	-367,279	-59,05	-1140,31	86,61	144,61	21,1	0,32
1000	M1	-439,382	-151,83	-1035	49,44	118,84	5,6	0,08
	M2	-377,254	-218,24	-1189,53	23,79	157,75	4,5	0,07
	M3	-428,718	-197,29	-1029,07	43,31	131,29	1,7	0,03

Fuente: [Elaboración propia]

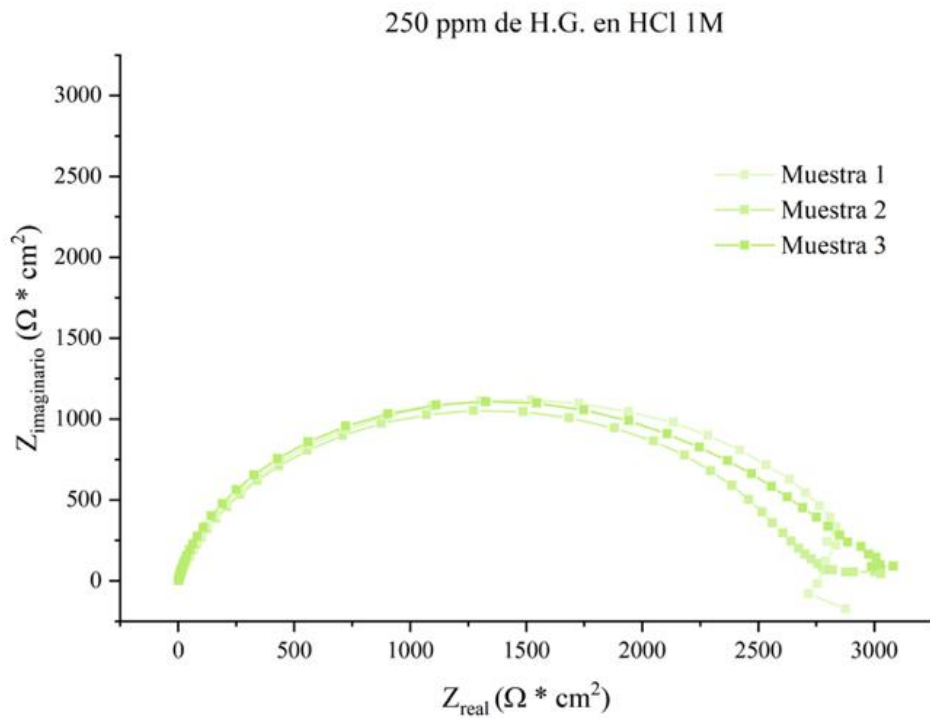
Apéndice 4. Diagramas de Nyquist triplicados por concentración.

Fuente: [Elaboración propia]

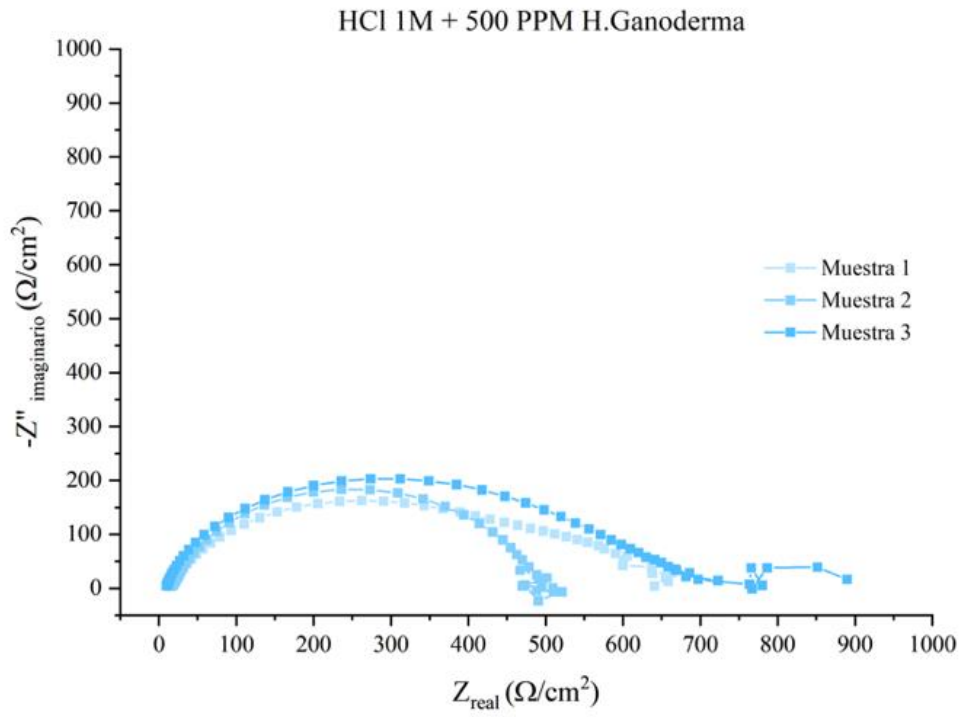
(a)



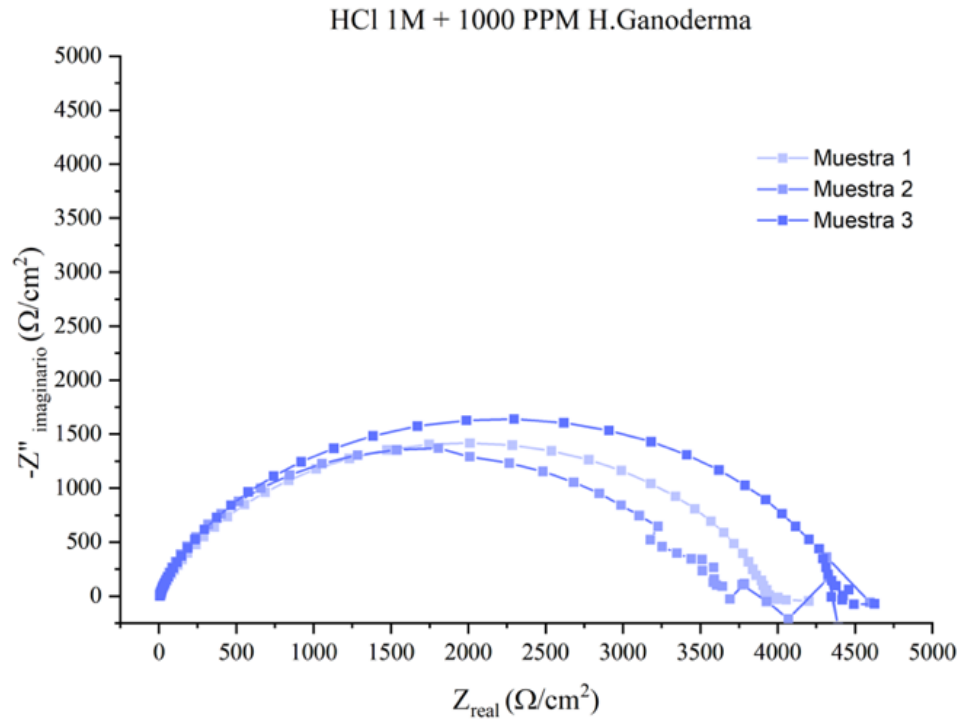
(b)



(c)



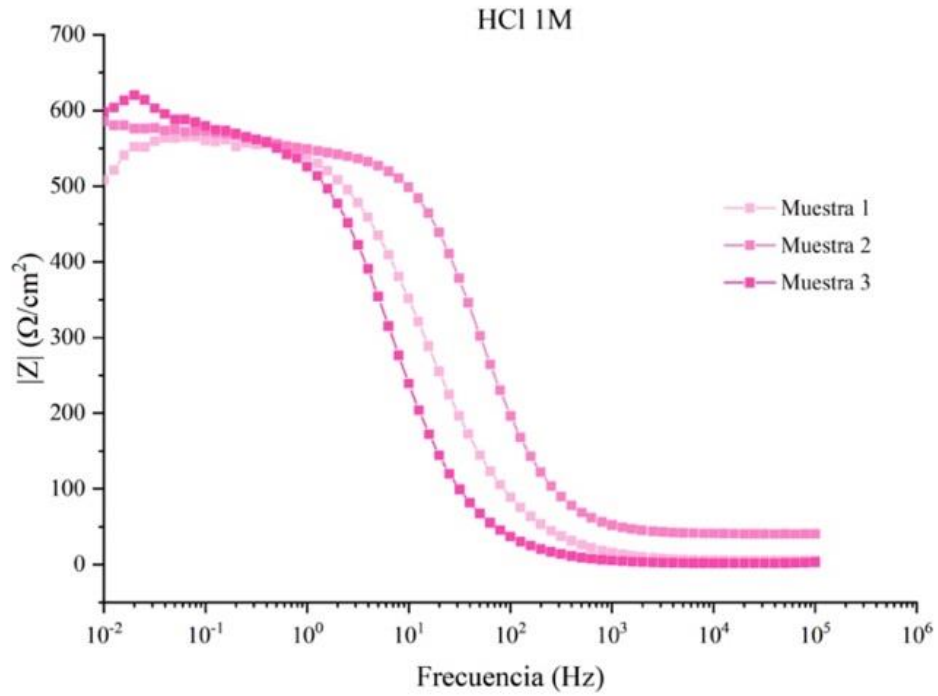
(d)



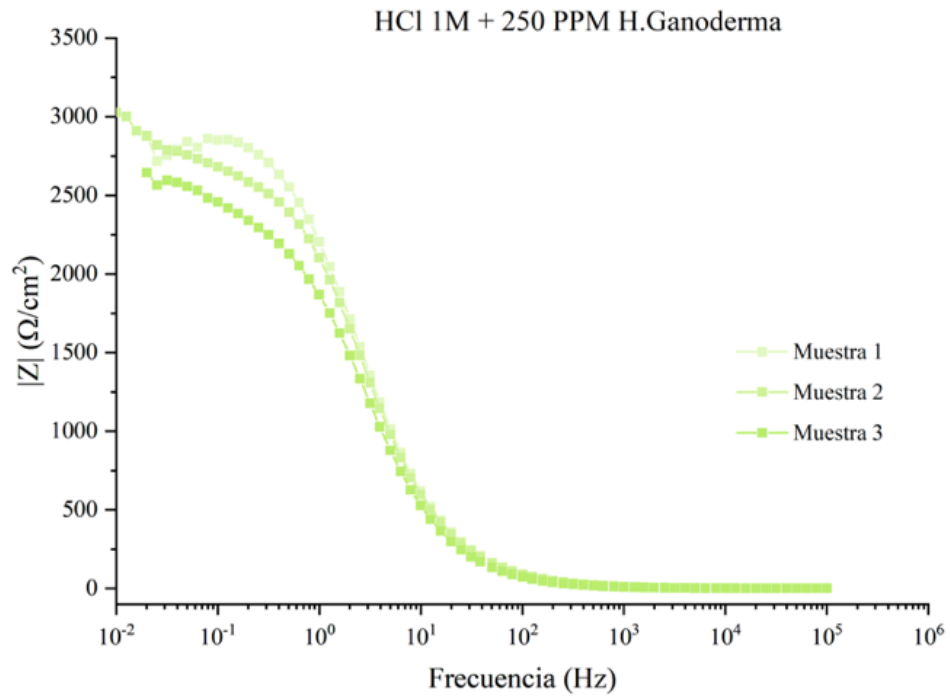
Apéndice 5. Diagramas de Bode triplicados por concentración. (Impedancia vs Frecuencia)

Fuente: [Elaboración Propia]

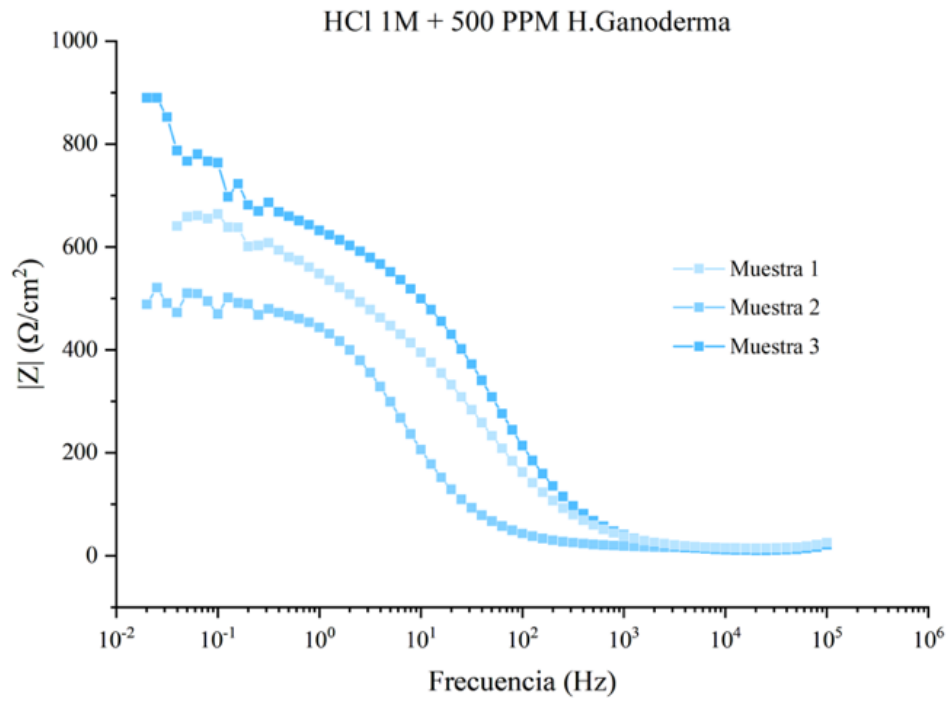
(a)



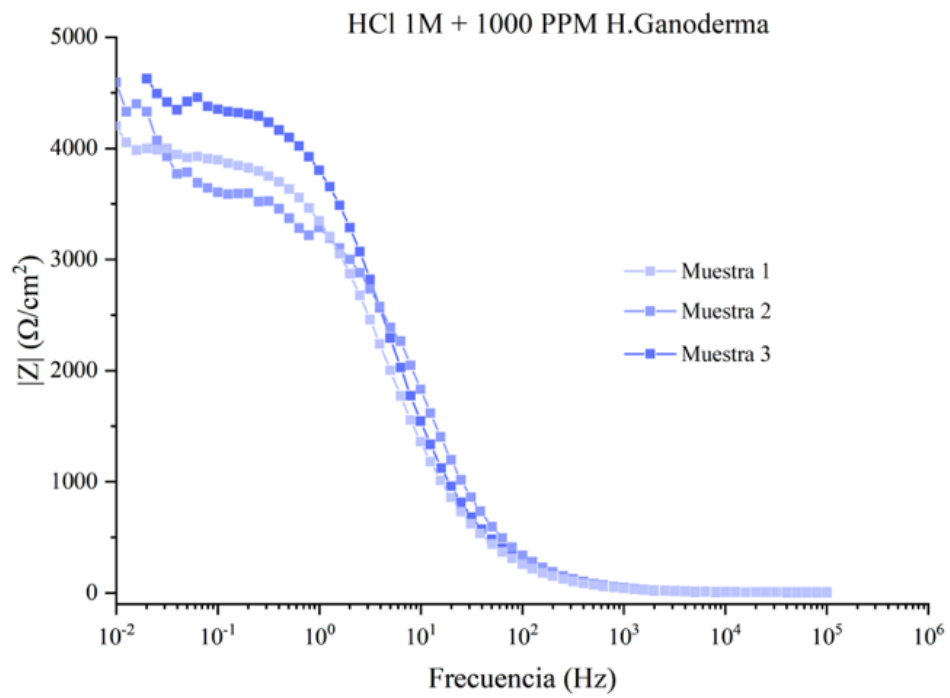
(b)



(c)

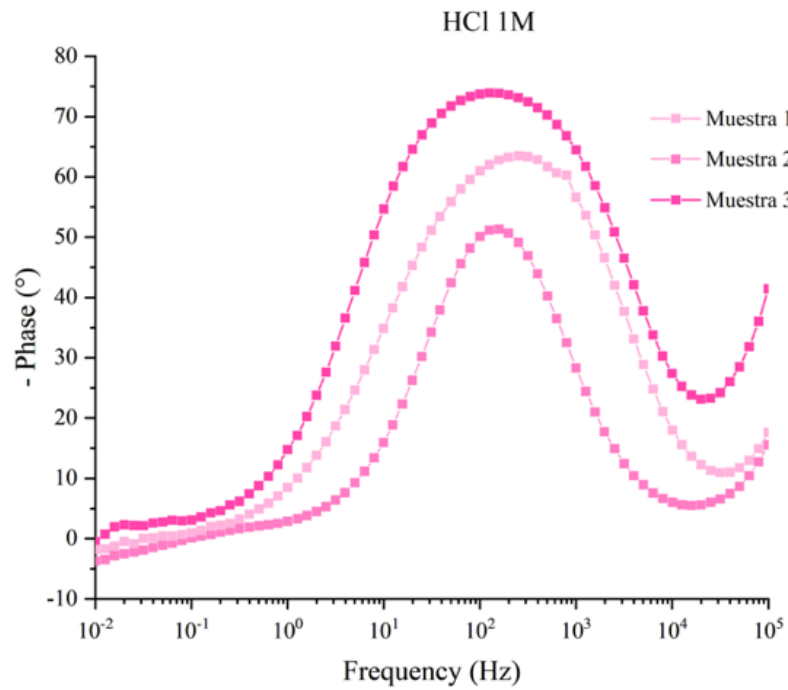


(d)

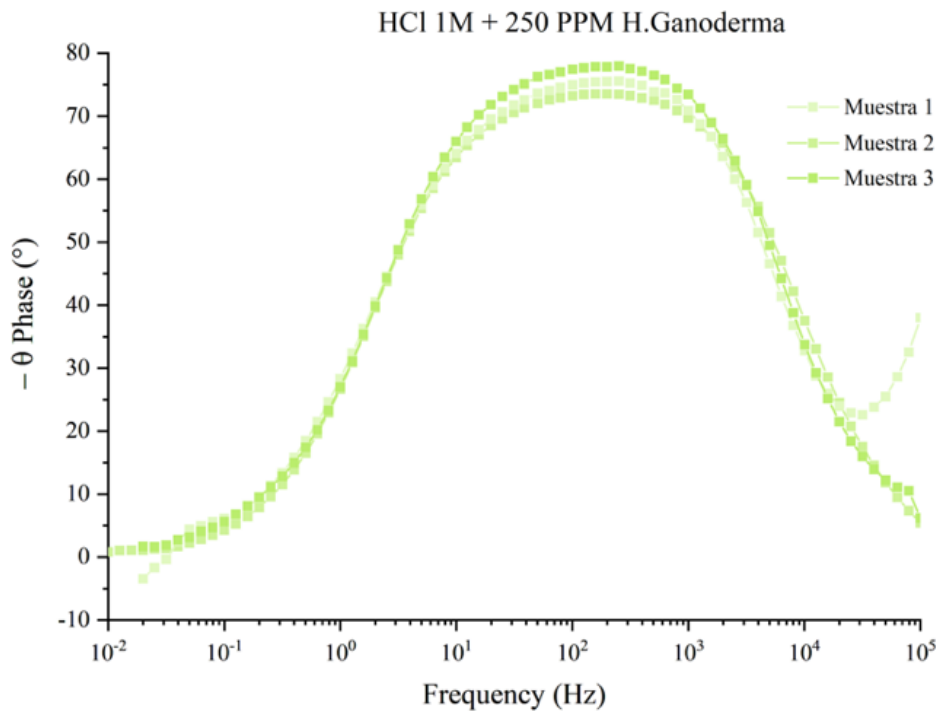


Apéndice 6. Diagramas de Bode por triplicado. (Ángulo de fase vs Frecuencia). Fuente: [Elaboración Propia]

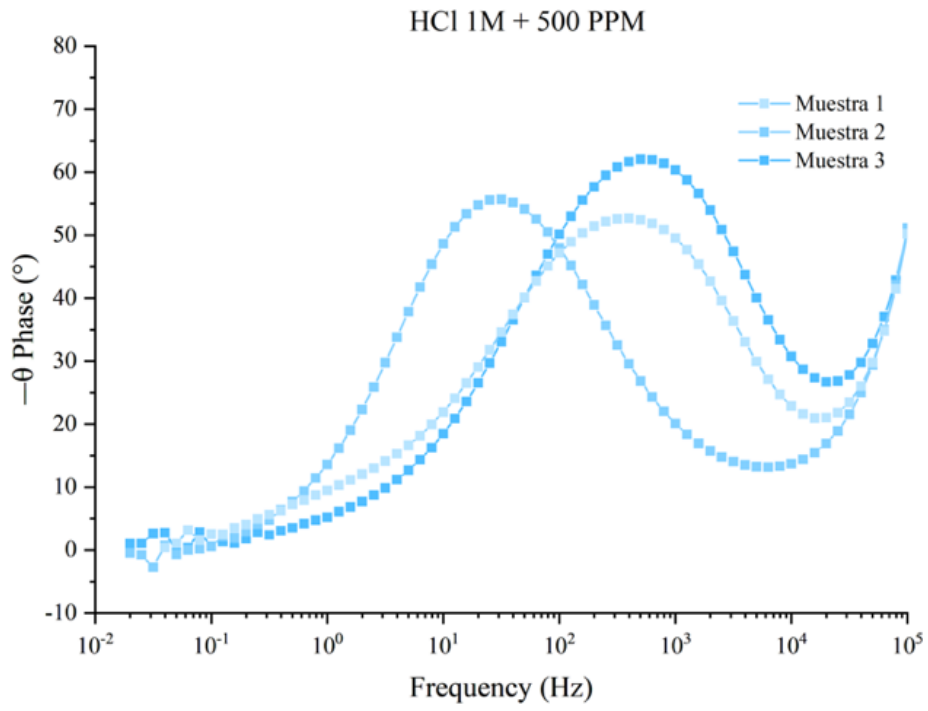
(a)



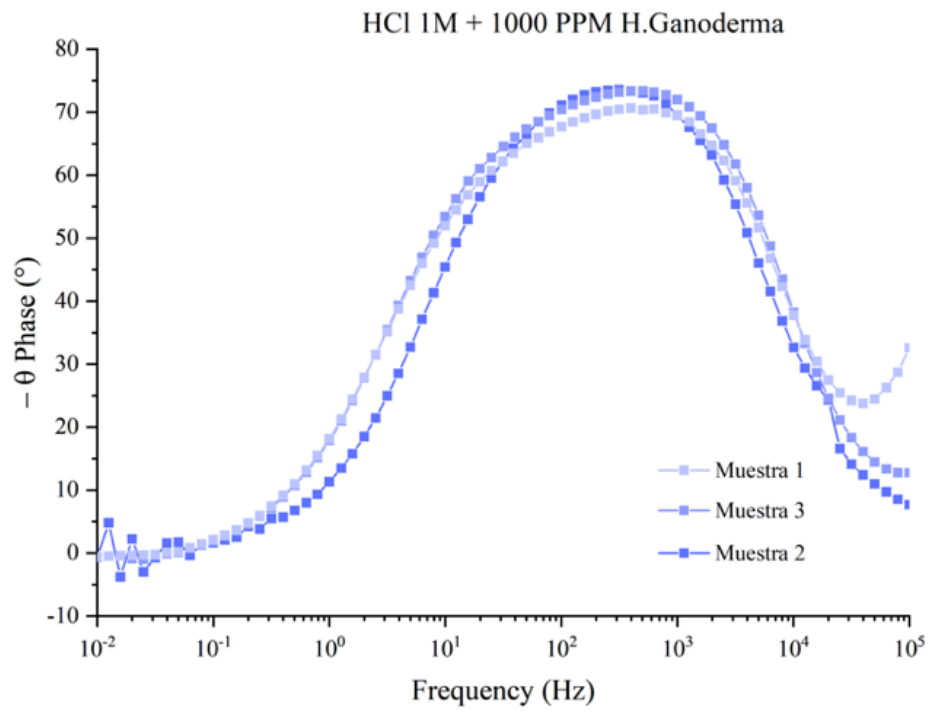
(b)



(c)



(d)



Apéndice 7. Resultados cuantitativos a partir de la EIS.

Tabla 15. Resultados de la Espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS)

HCl 1M	Z' baja frec (Ω/cm^2)	Z' alta frec (Ω/cm^2)	Rct (Ω/cm^2)	frec max (Hz)	Cdl	C ($\mu F/cm^2$)	Rs (Ω/cm^2)	Resis. Polarización (Ω/cm^2)	Eficiencia %
M1 Blanco	560,11	5,45	554,66	15,63	1,84E-05	18,36	5,45	560,11	-
M2 Blanco	538,72	18,89	519,83	9,93	3,08E-05	30,83	18,89	538,72	-
M3 Blanco	587,77	5,50	582,27	5,01	5,45E-05	54,54	5,50	587,77	-
M1 250ppm	2790,43	10,39	2780,05	1,58	3,61E-05	36,13	10,39	2790,43	
M2 250ppm	2755,86	17,74	2738,12	2,00	2,91E-05	29,09	17,74	2755,86	80,49
M3 250ppm	2976,16	4,09	2972,07	2,00	2,68E-05	26,80	4,09	2976,16	
M1 500ppm	599,56	13,81	585,74	25,12	1,08E-05	10,82	13,81	599,56	
M2 500ppm	501,39	18,46	482,93	5,01	6,58E-05	65,76	18,46	501,39	4,77
M3 500ppm	681,40	10,37	671,03	31,62	7,50E-06	7,50	10,37	681,40	
M1 1000ppm	3894,62	6,82	3887,80	3,16	1,30E-05	12,96	6,82	3894,62	
M2 1000ppm	3588,92	8,35	3580,57	6,32	7,04E-06	7,04	8,35	3588,92	85,93
M3 1000ppm	4315,50	5,98	4309,51	3,16	1,17E-05	11,69	5,98	4315,50	

Fuente: [Elaboración propia]

Apéndice 8. Análisis completo del espectro FTIR obtenido.

Tabla 16. Picos analizados en el espectro FTIR.

Pico (cm ⁻¹)	Rango típico (cm ⁻¹)	Grupo funcional	Importancia	Compuestos asociados
3250	3200 – 3600	O–H (alcoholes/fenoles), N–H (aminas/amidas)	Adsorción por enlaces de hidrógeno o polaridad	Polifenoles, polisacáridos
2928	2850 – 2960	C–H (alquilos –CH ₂ – y – CH ₃)	Contribuye a la capa hidrofóbica protectora	Triterpenos, ácidos grasos
1710	1690 – 1750	C=O (carbonilo)	Interacción con la superficie metálica	Ácidos orgánicos, triterpenos oxigenados
1510-1595	1500 – 1600	C=C aromático, deformación N–H	Aporta estabilidad a la película protectora	Fenoles, Polifenoles, estructuras aromáticas
1380	1370 – 1390	C–H (flexión de –CH ₃), grupo fenólico	Presencia de comp. fenólicos activos	Flavonoides, compuestos fenólicos
1265	1200 – 1350	C–O (fenoles, éteres, ésteres)	Estructuras polares adsorbentes	Glicósidos, éteres, polisacáridos
1217	1200 – 1300	C–N (aminas/alcaloides), C–O (ésteres, alcoholes)	Enlaces con la superficie del metal	Aminoácidos, alcaloides, ésteres
1028	1000 – 1100	C–O–C (éteres, polisacáridos)	Formación de barreras físicas sobre el metal	β-glucanos, polisacáridos

Adaptado de: [29], [30], [70], [72], [73]

