

UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO



DIVISIÓN ACADÉMICA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

**DESARROLLO DE INHIBIDORES ELABORADOS CON EXTRACTOS DE
PLANTAS Y ADITIVOS SINÉRGICOS PARA EL CONTROL DE LA
CORROSIÓN DEL ACERO EN MEDIOS ÁCIDOS Y ALCALINOS**

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTORA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA

PRESENTA:

M.C. JAZMIN DEL ROSARIO TORRES HERNÁNDEZ

BAJO LA DIRECCIÓN DE:

DRA. EBELIA DEL ÁNGEL MERAZ

EN CODIRECCIÓN:

DR. FRANCISCO EDUARDO CORVO PÉREZ

CUNDUACÁN, TABASCO, ABRIL DE 2025



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO



DIVISIÓN ACADÉMICA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

**DESARROLLO DE INHIBIDORES ELABORADOS CON EXTRACTOS DE
PLANTAS Y ADITIVOS SINÉRGICOS PARA EL CONTROL DE LA
CORROSIÓN DEL ACERO EN MEDIOS ÁCIDOS Y ALCALINOS**

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTORA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA

PRESENTA:

M.C. JAZMIN DEL ROSARIO TORRES HERNÁNDEZ

BAJO LA DIRECCIÓN DE:

DRA. EBELIA DEL ÁNGEL MERAZ

EN CODIRECCIÓN:

DR. FRANCISCO EDUARDO CORVO PÉREZ

CUNDUACÁN, TABASCO, ABRIL DE 2025 •

Declaración de Autoría y Originalidad

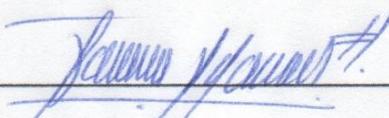
En la ciudad de Cunduacán, Tabasco, el día 01 del mes de abril del año 2025, el que suscribe M.C. Jazmín del Rosario Torres Hernández alumna del Programa de Doctorado en Ciencias en Ingeniería con número de matrícula 202D20002, adscrito a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, como autor de la Tesis presentada para la obtención del grado y titulada Desarrollo de inhibidores elaborados con extractos de plantas y aditivos sinérgicos para el control de la corrosión del acero en medios ácidos y alcalinos dirigida por la Dra. Ebelia del Angel Meraz y el Dr. Francisco Eduardo Corvo Pérez.

DECLARO QUE:

La Tesis es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, de acuerdo con el ordenamiento jurídico vigente, en particular, la LEY FEDERAL DEL DERECHO DE AUTOR (Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Ley Federal del Derecho de Autor del 01 de Julio de 2020 regularizando, aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), en particular, las disposiciones referidas al derecho de cita.

Del mismo modo, asumo frente a la Universidad cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría o falta de originalidad o contenido de la Tesis presentada de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente.

Cunduacán, Tabasco a 01 de abril de 2025.



M.C. Jazmín del Rosario Torres Hernández



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



División
Académica
de Ingeniería
y Arquitectura



JEFATURA DE POSGRADO

Cunduacán, Tabasco a 26 de marzo de 2025
MEM/AP-DAIA/41/2025

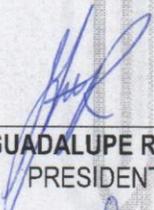
PARA **DRA. DORA MARÍA FRÍAS MÁRQUEZ**
DIRECTORA DE LA DAIA
DE: COMISIÓN SINODAL
ASUNTO: APROBACIÓN DE IMPRESIÓN DE TESIS DE DOCTORADO

Una vez hecha la revisión detallada del Trabajo de Tesis denominado:

"Desarrollo de inhibidores elaborados con extractos de plantas y aditivos sinérgicos para el control de la corrosión del acero en medios ácidos y alcalinos"

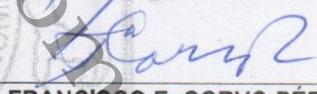
Desarrollado por la MC(MNO): **Jazmín del Rosario Torres Hernández**, del **Doctorado en Ciencias en Ingeniería**, le comunicamos que aceptamos la impresión del trabajo, ya que el mismo ha cumplido con los requisitos necesarios.

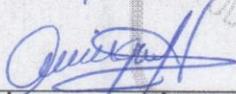
COMITÉ SINODAL


DRA. MA. GUADALUPE RIVERA RUEDAS
PRESIDENTE

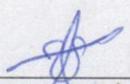

DR. JUAN BARAJAS FERNÁNDEZ
SECRETARIO


DRA. EBELIA DEL ÁNGEL MERÁZ
VOCAL 1


DR. FRANCISCO E. CORVO PÉREZ
VOCAL 2


DR. MIGUEL ÁNGEL HERNÁNDEZ RIVERA
VOCAL 3


DRA. KARLA MARÍA AGUILAR CASTRO
VOCAL 4


DR. EDGAR VICENTE GARCÍA MELO
VOCAL 5



UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



División
Académica
de Ingeniería
y Arquitectura



2025
AÑO DE LA
Mujer
Indígena

DIRECCIÓN

OFICIO: DAIA/DIR/438/2025
FECHA: 01 de abril de 2025
ASUNTO: Autorización de
impresión definitiva

M.C.(MNO). JAZMÍN DEL ROSARIO TORRES HERNÁNDEZ
PASANTE DEL DOCTORADO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA
PRESENTE

En virtud de haber elaborado su trabajo de Tesis denominado:

"Desarrollo de inhibidores elaborados con extractos de plantas y aditivos sinérgicos para el control de la corrosión del acero en medios ácidos y alcalinos"

Para obtener el grado de **Doctor en Ciencias en Ingeniería** y en el cual ha tenido como Directora de Tesis a la Dra. Ebelia del Ángel Meraz y su Co - Director al Dr. Francisco Eduardo Corvo Pérez.

Tengo a bien autorizarle la **IMPRESIÓN DEFINITIVA** de dicho trabajo, continuando con los trámites correspondientes para su examen de obtención de grado.

Sin otro particular, le envío un afectuoso saludo.

ATENTAMENTE

DRA. DORA MARÍA FRÍAS MÁRQUEZ
DIRECTORA



DIRECCIÓN

c.c.p. Archivo
DRA'DMFM / MCA'RACT

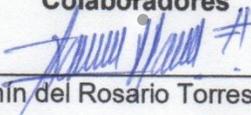
Carta de Cesión de Derechos

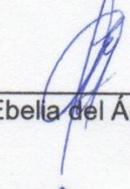
Cunduacán, Tabasco a 25 de marzo del 2025

Por medio de la presente manifestamos haber colaborado como AUTOR(A) y/o AUTORES (RAS) en la producción, creación y/o realización de la obra denominada Desarrollo de inhibidores elaborados con extractos de plantas y aditivos sinérgicos para el control de la corrosión del acero en medios ácidos y alcalinos.

Con fundamento en el artículo 83 de la Ley Federal del Derecho de Autor y toda vez que, la creación y/o realización de la obra antes mencionada se realizó bajo la comisión de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco; entendemos y aceptamos el alcance del artículo en mención, de que tenemos el derecho al reconocimiento como autores de la obra, y la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco mantendrá en un 100% la titularidad de los derechos patrimoniales por un periodo de 20 años sobre la obra en la que colaboramos, por lo anterior, cedemos el derecho patrimonial exclusivo en favor de la universidad.

Colaboradores

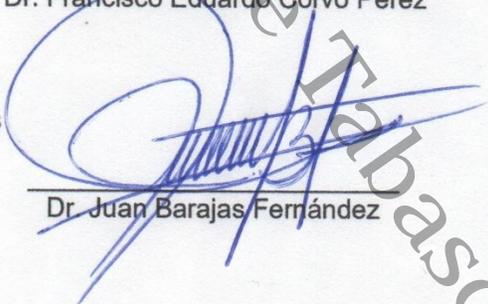

M.C. Jazmín del Rosario Torres Hernández


Dra. Ebella del Ángel Meraz


Dr. Francisco Eduardo Corvo Pérez

Testigos


Dra. Ma Guadalupe Rivera Ruedas


Dr. Juan Barajas Ferrández

DEDICATORIA

A Dios por guiarme y darme fortaleza para culminar con éxito el trabajo de investigación, así como la obtención del grado e iluminar mi camino poniendo a las personas idóneas para lograr mi meta profesional.

A mi gran esposo y a mis maravillosos hijos, por ser la motivación de mantenerme en pie y motivarme cada día para concluir el proyecto de investigación, siendo el respaldo de mí persona ante cualquier adversidad.

A mis padres por su apoyo incondicional y darme su confianza para la travesía del estudio profesional.

Nadie se engañe a sí mismo; si alguno entre vosotros se cree sabio en éste siglo, hágase ignorante, para que llegue a ser sabio.

1 Corintios 3:18

AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por financiar la trayectoria de mis estudios de posgrado.

A mi Directora de Tesis, a la Dra. Ebelia del Ángel Meraz, por haberme motivado a realizar mi proyecto y fomentar en mí el espíritu de investigación y al Dr. Francisco Eduardo Corvo Pérez, por compartir sus conocimientos, sus consejos, recomendaciones y experiencias. A los dos por su apoyo incondicional, paciencia y guiarme en la formación profesional.

Al comité sinodal formado por la Dra. Ma Guadalupe Rivera Ruedas, Dr. Juan Barajas Fernández, el Dr. Miguel Ángel Hernández Rivera, Dra. Karla María Aguilar Castro y al Dr. Edgar Vicente Macías Melo, por sus oportunas intervenciones y sugerencias para la mejora de éste trabajo, de igual forma por sus consejos mostrando sus capacidades profesionales en todo momento.

A los profesores investigadores de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco y la Universidad Autónoma de Campeche por la oportunidad del ingreso a los laboratorios para hacer uso de los equipos: Laboratorio de Ingeniería de Superficies y Energías Renovables, Laboratorio de Análisis y Caracterización, Laboratorio de Caracterización de Materiales (DAJM-Jalpa de Méndez) y Laboratorio de Nanotecnología para Aplicación en Biomedicina y Medio Ambiente.

A mis compañeros por su apoyo y su aporte en recomendaciones y uso de equipos en los laboratorios.

Índice de Contenido

I. INTRODUCCIÓN.....	17
II. MARCO TEÓRICO.....	19
2.1 Definición de Inhibidores de Corrosión.....	19
2.2 Clasificación de los Inhibidores de Corrosión.....	19
2.2.1 Inhibidores Inorgánicos.....	21
2.2.2 Inhibidores Orgánicos.....	21
2.3 Mecanismos de Corrosión.....	22
2.3.1 Inhibidores de Corrosión en Soluciones Alcalinas.....	23
2.3.2 Efecto Sinérgico Sobre los Inhibidores de Corrosión.....	24
2.4 Inhibidores Organicos a partir de Extractos de Plantas.....	25
2.4.1 La Musa Paradisiaca (Cáscara de Plátano).....	26
2.4.2 La Tradescantia Spathacea (Maguey Morado).....	28
2.5 Técnicas Electroquímicas.....	29
2.5.1 Potencial a Circuito Abierto.....	29
2.5.2 Polarización Potenciodinámica (PPD).....	29
2.5.3 Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIE).....	31
2.6 Técnica de Pérdida de Peso.....	32
2.7 Isotermas de Adsorción.....	32
2.7.1 Isoterma de Langmuir.....	32
2.7.2 Isoterma de Freundlich.....	33
2.7.3 Isoterma de Temkin.....	33
III. JUSTIFICACIÓN.....	34
IV. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN E HIPÓTESIS.....	35
4.1 Pregunta de investigación.....	35
4.2 Hipótesis.....	35
V. OBJETIVO.....	36

5.1 Objetivo General	36
5.2 <i>Objetivos Específicos</i>	36
VI. METODOLOGÍA	37
6.1 Preparación del Inhibidor de EHTS y ECMP	37
6.2 Caracterización de los Inhibidores	40
6.2.1 <i>Espectroscopía UV-Visible</i>	40
6.2.2 <i>Espectroscopía FTIR</i>	40
6.3 Estudio de Pérdida de Peso	40
6.4 Pruebas Electroquímicas	42
6.5 Isotermas de Adsorción	43
VII. RESULTADOS Y DISCUSIONES	44
7.1 Análisis de Cromatografía (GC-MS)	44
7.2 Análisis de UV-Vis	46
7.3 Análisis de Espectroscopía FTIR	47
7.4 Análisis de Técnicas Electroquímicas en Medio Ácido con EHTS	48
7.5 Análisis de Técnicas Electroquímicas en Medio Ácido con ECMP	54
7.6 Pérdida de Peso en Medio Ácido del EHTS y el ECMP	59
7.7 Técnicas Electroquímicas con el EHTS en Medio Alcalino	63
7.8 Pérdida de Peso de EHTS en Medio Alcalino	68
7.9 Técnicas Electroquímicas con el ECMP en Medio Alcalino	69
7.10 Pérdida de peso de ECMP en Medio Alcalino	74
7.11 Adición de Aditivo Sinérgico del ECMP en Medio Ácido	83
7.12 Caracterización de Superficies del Acero con el EHTS en Medio ácido	90
7.13 Caracterización de Superficies del Acero con el ECMP en Medio Ácido	91
7.14 Pruebas de Envejecimiento para el ECMP y el EHTS en Medio Ácido	92
VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	98
ANEXO 1. Artículos Publicado	116

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Índice de Tablas

Tabla 1. Estudios preliminares de extractos de plantas en medio ácido.....	25
Tabla 2. Estudios preliminares de extractos de plantas en medio alcalino.....	26
Tabla 3. Diseño experimental para el EHTS.....	39
Tabla 4. Diseño experimental para el ECMP.....	39
Tabla 5. Modelos de isótermas de adsorción para el EHTS.....	43
Tabla 6. Compuestos identificados por Cromatografía de gases (GC-MS) con detector de masas en el análisis del EHTS.....	45
Tabla 7. Compuestos identificados por Cromatografía de gases (GC-MS) con detector de masas en el análisis del ECMP.....	46
Tabla 8. Parámetros de resistencia a la polarización del acero al carbón SAE 1010 en HCl del EHTS.....	51
Tabla 9. Parámetros de EIE para el acero 1010 en 1 M de HCl del EHTS.....	54
Tabla 10. Cambios en E_{corr} , I_{corr} , β_a , β_c , eficiencia (η) y cobertura (θ) de acero en medio ácido con y sin adición de ECMP.....	56
Tabla 11. Parámetros para el acero 1010 en 1 M de HCl del ECMP.....	59
Tabla 12. Parámetros de corrosión de pérdida de peso a diferentes concentraciones del EHTS.....	60
Tabla 13. Parámetros de corrosión de pérdida de peso a diferentes concentraciones del ECMP.....	60
Tabla 14. Resultados reportados en la literatura sobre inhibidor de corrosión de Musa paradisiaca y de éste trabajo.....	62
Tabla 15. Cobertura superficial y capacidad de doble capa determinadas a diferentes concentraciones de extractos de ECMP y tres diferentes tiempos de inmersión.....	63
Tabla 16. Parámetros electroquímicos obtenidos con la técnica de polarización potenciodinámica en una solución alcalina de NaCl al 3.5% y con diferentes concentraciones del EHTS.....	65
Tabla 17. Parámetros de EIE para el acero 1010 en solución del 3.5% de NaCl con EHTS68	
Tabla 18. Parámetros de corrosión de PP a diferentes concentraciones del EHTS en medio alcalino.....	68
Tabla 19. Parámetros electroquímicos obtenidos con la a técnica de PPD en una solución alcalina de NaCl al 3.5% y con diferentes concentraciones del ECMP.....	71

Tabla 20. Parámetros de EIE para el acero 1010 en solución del 3.5% de NaCl con EHTS.....	74
Tabla 21. Parámetros de corrosión de PP a diferentes concentraciones del ECMP en medio alcalino	74
Tabla 22. Coeficiente de correlación cuadrática, intercepto y pendiente, calculados para los tres tipos de isothermas ajustadas a tres tiempos de inmersión diferentes por PPD	77
Tabla 23. Coeficiente de correlación cuadrática, intercepto y pendiente calculados para los tres tipos de isothermas ajustadas en tres tiempos de inmersión diferentes, de EIE (EHTS).....	78
Tabla 24. Coeficiente de correlación cuadrático, intercepto y pendiente de PP (EHTS)	78
Tabla 25. Kads calculada según la isoterma de Langmuir	78
Tabla 26. Parámetros calculados para los tres tipos de modelos de isoterma en tres tiempos de inmersión diferentes. Datos obtenidos por PPD.....	80
Tabla 27. Coeficiente de correlación cuadrática, intercepto y pendiente calculados para los tres tipos de modelos de isothermas en tres tiempos de inmersión diferentes. Datos obtenidos por EIE	81
Tabla 28. Coeficiente de correlación cuadrática, intercepto y pendiente, datos obtenidos por PP.....	82
Tabla 29. Kads calculados según la isoterma de Langmuir	83
Tabla 30. Cambios en E_{com} , I_{com} , β_a , β_c , eficiencia (η) y cobertura (θ) de acero en medio ácido con y sin adición de ECMP-KI	85
Tabla 31. Rct y eficiencia de inhibición del acero SAE 1010 en solución de HCl 1M con adición de diferentes concentraciones del ECMP-KI en tres tiempos de inmersión.....	87
Tabla 32. Resultados reportados en la literatura sobre inhibidor de corrosión con aditivos sinérgicos	88
Tabla 33. Cobertura superficial y capacidad de doble capa determinadas a diferentes concentraciones de extractos de ECMP con KI y tres diferentes tiempos de inmersión	89
Tabla 34. Parámetros para el acero 1010 en solución ácida con el ECMP y EHTS.....	94
Tabla 35. Resultados de Cromatografía GC-MS en solución ácida del ECMP.....	95
Tabla 36. Resultados de Cromatografía GC-MS en solución ácida del EHTS.....	96

Índice de Figuras

Figura 1. Clasificación de inhibidores verdes o inhibidores ecológicos	20
Figura 2. Posibles compuestos de extracción utilizando diferentes solventes.....	22
Figura 3. Mecanismo de corrosión sin aplicación de inhibidor y con aplicación del inhibidor.....	23
Figura 4. Planta de <i>Musa paradisiaca</i>	27
Figura 5. Planta de la <i>Tradescantia spathacea</i>	28
Figura 6. Diagrama de Tafel.....	30
Figura 7. Diagrama de Nyquist.....	31
Figura 8. Extracción de compuestos de la hoja de <i>Tradescantia spathacea</i>	37
Figura 9. Extracción de compuestos de la cáscara de <i>Musa Paradisiaca</i>	38
Figura 10. Pasos de elaboración del electrodo de trabajo.....	41
Figura 11. Estudio de pérdida de peso (PP).....	41
Figura 12. a) Cromatografía GC-MS del EHTS y b) Cromatografía GC-MS del ECMP	44
Figura 13. Espectro UV-Vis del EHTS y del b) ECMP	47
Figura 14. Espectros de infrarrojo (FTIR) de los extractos estudiados como inhibidores verdes de corrosión del acero al carbono SAE 1010. a) EHTS y b) ECMP.....	48
Figura 15. Mediciones de OCP de los extractos estudiados a) con EHTS y b) con ECMP.....	49
Figura 16. Curvas de polarización de Tafel para el EHTS a diferentes concentraciones en tiempos de inmersión de a) 1 h, b) 24 h y c) 48 h.....	50
Figura 17. Diagramas de Nyquist a diferentes concentraciones del EHTS en: a) 1 h de inmersión, b) 24 h de inmersión, c) 48 h de inmersión y d) circuito eléctrico equivalente.....	53
Figura 18. Curvas de polarización de Tafel para acero a diferentes concentraciones de ECMP y tiempos de inmersión: a) 1 h, b) 24 h y c) 48 h.....	55
Figura 19. Diagramas de Nyquist a diferentes concentraciones del ECMP en: a) 1 h de inmersión, b) 24 h de inmersión, c) 48 h de inmersión y d) circuito eléctrico equivalente.....	58
Figura 20. Velocidad de corrosión del acero al carbon SAE 1010 y porcentaje de eficiencia a)EHTS y b)ECMP.....	61
Figura 21. Curvas de polarización potenciodinámica del EHTS en medio alcalino en tiempos de inmersión de: (a) 1 h, (b) 24 h y (c) 48 h.....	64
Figura 22. Diagramas de Nyquist del EHTS en medio alcalino en tiempos de inmersión de: (a) 1 h, (b) 24 h y (c) 48 h.....	67
Figura 23. Velocidad de corrosión (V_{cor}) del EHTS en medio alcalino.....	69

Figura 24. Curvas de polarización potenciodinámica del ECMP en medio alcalino en tiempos de inmersión de: a) 1 h, b) 24 h y c) 48 h	70
Figura 25. Diagramas de Nyquist del ECMP en medio alcalino en tiempos de inmersión de: a) 1 h, b) 24 h y c) 48 h	73
Figura 26. Velocidad de corrosión (V_{corr}) del ECMP en medio alcalino	75
Figura 27. Isoterma de adsorción de a) Langmuir, b) Temkin y c) Freundlich, con los datos de la técnica de PPD para el EHTS.....	76
Figura 28. Isotermas del ECMP ajustadas a modelos de: a) Langmuir b) Temkin y c) Freundlich.....	79
Figura 29. Curvas de PPD del ECMP-KI en medio ácido en tiempos de inmersión de: a) 1 h, b) 24 h y c) 48 h	84
Figura 30. Diagramas Nyquist del ECMP-KI en medio ácido, con tiempos de inmersión de: a) 1 h, b) 24 h y c) 48 h	86
Figura 31. SEM-EDS del acero: a) superficie limpia y pulida, b) sumergido en solución de HCl sin inhibidor y c) sumergido en HCl con adición de 1200 ppm de EHTS.....	91
Figura 32 SEM-EDX en tiempos de inmersión de HCl de 48 h del acero a) limpia y pulida, b) después de la inmersión, c) en inmersión a 1000 ppm del ECMP y d) en inmersión de 1000 ppm+KI.....	92
Figura 33. Diagramas de Nyquist a concentraciones de 1000 ppm en solución ácida del: a) ECMP de 1 h de inmersión y b) a concentraciones de 1200 ppm del EHTS de 1 h de inmersión	93

Universidad Veracruzana Autónoma de Tabasco.

Nomenclatura

Símbolo	Definición
ECMP	Extracto de la cáscara de <i>Musa paradisiaca</i>
EHTS	Extracto de la hoja de <i>Tradescantia spathacea</i>
Fe	Hierro
HCl	Ácido clorhídrico
H ₂ O	Agua
KI	Yoduro de potasio
N	Nitrógeno
NaCl	Cloruro de sodio
O	Oxígeno
P	Fósforo
PPD	Polarización potenciodinámica
S	Azufre
SiC	Carburo de silicio

Desarrollo de inhibidores elaborados con extractos de plantas y aditivos sinérgicos para el control de la corrosión del acero en medios ácidos y alcalinos

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

I. INTRODUCCIÓN

La corrosión es el proceso del deterioro de propiedades físicas y químicas de un material metálico donde ocurren reacciones electroquímicas de óxido-reducción que provocan desgaste en el material (Salazar Jiménez, 2015), por lo tanto, existen diversos métodos de prevención y control de corrosión como; recubrimientos, protección catódica y uso de inhibidores de corrosión orgánicos e inorgánicos (Zhu y Zi, 2017; Czaban Magdalena, 2018a; Byrne et al., 2020;). El acero utilizado en la construcción de plantas industriales está sujeto a la corrosión debido a la presencia de sustancias corrosivas. Siendo el acero al carbón el más común en las industrias debido a la disponibilidad, costos y propiedades mecánicas, sin embargo, es altamente sensible a la corrosión en medios ácidos (HCl, H₂SO₄), soluciones alcalinas, salmueras entre otros, lo que provoca una disolución y pérdida del metal (Agiriga et al., 2020; Bhuvaneswari et al., 2020; Eka et al., 2021; Koursaoui et al., 2021; Saxena et al., 2021), la presencia de agentes agresivos como: sulfatos, cloruros y dióxido de carbono causan la pérdida de pasividad del metal e inicia el fenómeno de la corrosión (Sowa y Simka, 2018). Siendo que en varios procesos industriales se utilizan soluciones ácidas y alcalinas para eliminar incrustaciones y óxidos (Knyazeva et al., 2021). Por lo tanto, estos inhibidores de compuestos orgánicos se agregan en medios ácidos y alcalinos en procesos industriales como limpieza alcalina (eliminación de suciedad), grabado (texturizado del acero) y decapado (eliminación de impurezas del acero) con la finalidad de mejorar la eficiencia del equipo o ducto (Emran et al., 2014). Controlar la corrosión en los aceros, ha sido motivo de estudio para muchos investigadores, específicamente los inhibidores de corrosión naturales conocidos también como “ver” porque no tienen efectos negativos en seguridad y costos para la conservación del material metálico, no son tóxicos para la salud, son amigables con el medio ambiente (Ekemini et al., 2024). Los compuestos se obtienen de plantas, frutos, semillas y tallos que contienen elementos como nitrógeno (N), azufre (S), oxígeno (O) y fósforo (P) considerados como heteroátomos que dan la característica de un extracto con efecto inhibidor y a la vez permiten que se carguen negativamente formándose una capa hidrofóbica en el acero (Xhanari y Finsgar, 2019; Muliastri et al., 2021).

De acuerdo con las modificaciones en la norma ISO 14001 surge la necesidad de crear y emplear inhibidores de compuestos orgánicos verdes por ser amigables con el medio ambiente y biodegradables. En la última década el uso de extractos de plantas se ha aplicado con más frecuencia, debido al contenido de grupos funcionales orgánicos que otorgan propiedades anticorrosivas para diversas aleaciones. Los componentes del inhibidor orgánico son absorbidos en la superficie del metal, formando múltiples moléculas que bloquean los sitios activos de corrosión (Mandujano et al., 2017). Estas sustancias retardan el proceso de corrosión,

incrementan la resistencia a la polarización anódica y/o catódica, reducen el movimiento o difusión de los iones hacia la superficie metálica y acrecientan la resistencia eléctrica de la superficie (Xhanari y Finsgar, 2019a). Según la literatura, para aumentar la eficiencia de un inhibidor orgánico en algunas ocasiones se incorporan cantidades mínimas de compuestos en búsqueda de sinergia con los compuestos orgánicos (Thabo et al., 2015), con la adición de sales iónicas de haluros o iones de zinc (Zn^{2+}) para que reaccione con los iones hidroxilo y precipiten en la superficie del metal, formando moléculas complejas que dificulten la oxidación (Al-Nami, 2021; Kaghazchi et al., 2021). En el caso particular de los inhibidores naturales, consisten en una mezcla de diferentes compuestos. Es muy posible que en dicha mezcla exista no solo un componente con propiedades inhibitorias, sino varios, ya que por lo general son moléculas con características bastante similares. Pudiera ocurrir que la presencia de varios componentes con características inhibitorias en la mezcla pueda implicar el reforzamiento del carácter inhibidor basado en un efecto sinérgico interno de la mezcla (Al-Amiery, Salman, et al., 2020; Al-Amiery, Shaker, et al., 2020; esToghan et al., 2024).

Debido a la problemática que causa la corrosión en los aceros en las zonas susceptibles a la corrosión como es en el estado de Tabasco, surge el interés por el uso de inhibidores elaborados con materiales orgánicos. Es importante señalar que la parte fundamental de esta investigación es el desarrollo de inhibidores orgánicos, extraídos de plantas nativas del estado de Tabasco, que permitan controlar la velocidad de corrosión. En el desarrollo de esta investigación se puede dar un valor agregado a la hoja de *Tradescantia spathacea* (EHTS) para potencializar su valor económico y desarrollo de la producción en el sureste de México, es importante mencionar que no se encontraron investigaciones reportadas en la literatura científica, siendo esta investigación la primera en publicarse, reportado en el artículo: *Tradescantia spathacea*: New green corrosion inhibitor for SAE 1010 steel in acid médium (Torres et al., 2023). De la misma forma se investigó el extracto de cáscara de plátano también conocida como *Musa paradisiaca* para darle un valor agregado a un producto considerado como desecho, por lo tanto, el objetivo de éste estudio fue investigar el efecto inhibidor con y sin aditivos sinérgicos, de los compuestos extraídos en una solución de 1M de HCl y en solución alcalina de 3.5% NaCl para el acero SAE 1010, la investigación fue reportada en el artículo de “*Musa paradisiaca* extract as a corrosion inhibitor of steel. Role of KI as a synergistic additive” (Torres, J., Rivera, M. et al., 2023).

De acuerdo con el diseño experimental, se probaron en la siguiente fase el extracto de la hoja de *Tradescantia spathacea* (EHTS) y el extracto de la cáscara de *Musa paradisiaca* (ECMP).

II. MARCO TEÓRICO

2.1 Definición de Inhibidores de Corrosión

El inhibidor de corrosión es un compuesto químico que puede ser agregado en fase líquida, vapor o líquida-vapor a un medio corrosivo permitiendo el control de la corrosión.

La acción del inhibidor sobre las reacciones redox, como se muestra en las Ecuaciones 1, 2 y 3 (particularizadas para el Fe) da lugar a la disminución de velocidad de corrosión en la superficie del metal, es decir, reduce la velocidad de reacción en la reacción anódica y/o reacción catódica.

De acuerdo con la reacción sobre la que actúa el inhibidor, se puede obtener inhibidores anódicos, catódicos o mixtos (Xhanari y Finsgar, 2019b; Zhu y Zi, 2017).



Los inhibidores de corrosión son de fácil aplicación para tratamientos continuos y/o discontinuos en una planta de procesos químicos (Al-Moubaraki y Obot, 2021).

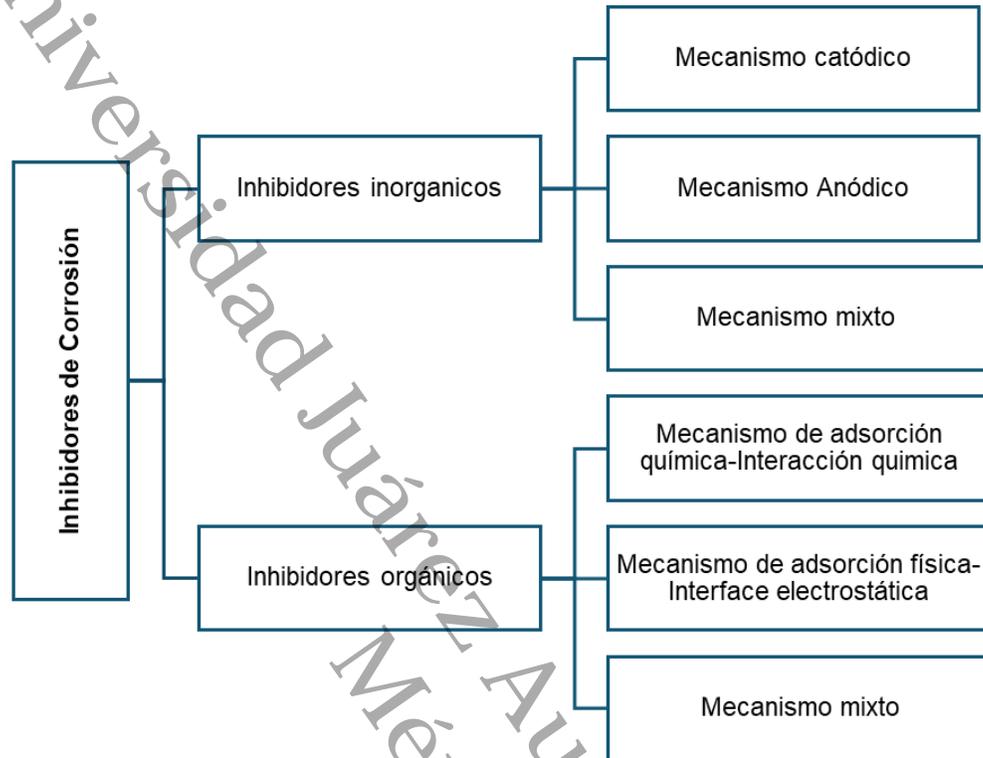
2.2 Clasificación de los Inhibidores de Corrosión

En algunas investigaciones se han informado que algunos de los compuestos utilizados para la elaboración de inhibidores de corrosión, son dañinos al medio ambiente, a los ecosistemas acuáticos y a la salud humana, para ello se ha estipulado regularizaciones y legislaciones a nivel internacional (Liam et al., 2023).

Por lo tanto, las investigaciones actuales se enfocan en utilizar materiales de bajo costos, que sean amigables con el medio ambiente, renovables y biodegradables a lo que se le conoce como inhibidores verdes de corrosión o inhibidores de corrosión ecológicos (El Ibrahimy et al., 2020). En la Figura 1 se muestra la clasificación general de los inhibidores de corrosión.

Figura 1

Clasificación de inhibidores de corrosión



Nota: La clasificación de inhibidores se muestra de forma global (Ioana et al., 2025).

Los extractos de plantas contienen compuestos orgánicos como inhibidores de corrosión, en estudios recientes se han reportado compuestos que contienen N, S, O, P y moléculas de compuestos heterocíclicos que se adsorben en la superficie del metal, logrando el bloqueo de sitios activos debido al contenido de un par de electrones que interactúan con los compuestos heterocíclicos. Se clasifican de acuerdo con el mecanismo de inhibición que pueden ser: anódico, catódico o mixto.

El interés en crear inhibidores de corrosión ecológicos está aumentando a medida que crece la preocupación por los efectos de los inhibidores químicos en el medio ambiente. Estos inhibidores no representan una amenaza menor para el medio ambiente, son biodegradables y se derivan de recursos renovables, como posibles inhibidores ecológicos (Shwetha et al., 2024).

En estudios recientes con respecto a otros productos naturales, de Ituen et al. (2020) evaluaron como inhibidor de corrosión el extracto de cáscara de fruta de *Hymenaea stigonocarpa* en ácido sulfúrico H_2SO_4 y con la técnica de polarización potenciodinámica se comprobó que es un inhibidor de tipo mixto que proporciona una eficiencia del 87 % (Policarpi

et al., 2020). Prabhu, et al. (2021) estudiaron la pectina en H_2SO_4 ésta mostró una eficiencia del 76.43 % siendo un inhibidor de tipo mixto (Prabhu et al., 2021). Kumar et al. (2021) estudiaron la *Murraya koenigii* Linn en ácido clorhídrico HCl comprobando que con la técnica de PPD eficiencia del 80.65 %, mientras que con la técnica de impedancia electroquímica mostraron eficiencia del 85.71 % de tipo mixto (Kumar et al., 2021), investigaciones de Kumar et al. (2021) mostraron que el extracto de té blanco en ácido clorhídrico, logran eficiencias del 96 % (Kaban et al., 2021). Estudios de Farahati et al. (2020) mostraron que el aminoácido cisteína en ácido clorhídrico alcanzó una eficiencia del 90 % con la técnica de PPD, comprobaron que es un inhibidor de tipo mixto (Farahati et al., 2020) y estudios de Barreto et al. (2021) mostraron que los extractos de la cáscara de ajo (*Allium sativum* L.) y la cáscara de cacao (*Theobroma* L.), lograron eficiencias del 90.7 % y 89% siendo inhibidores de tipo mixto (Barreto et al., 2021).

2.2.1 Inhibidores Inorgánicos

Los inhibidores inorgánicos son tóxicos quedando restringido su uso para aplicaciones industriales, por lo tanto, se han utilizado compuestos de cromato como inhibidor de corrosión en sistemas acuáticos y en soluciones de NaCl (Abdo et al., 2020). Los inhibidores inorgánicos son más usados en sistemas acuosos, se caracteriza por formar capas pasivas en la superficie del metal evitando el proceso de corrosión por picadura y corrosión por grietas, se han reportado que las sales de lantánidos como el $CeCl_3$, $La(NO_3)_3$ y $Sm(NO_3)_3$, $LaCl_3$ y $SmCl_3$ se han utilizado como inhibidores inorgánicos de corrosión (Wei et al., 2020).

En otras investigaciones usaron partículas de cerio, observaron un fenómeno llamado sobreprecipitación, que se atribuye a la pérdida de coherencia cuando la película alcanza el espesor crítico o máximo (Wend et al., 2024). Los inhibidores que contienen iones de nitrato son considerados inhibidores de corrosión tipo anódico mientras que los nitratos de tierras raras son de tipo mixtos, sin embargo, su eficiencia disminuye al aumentar la concentración (Kurtela et al., 2020; Rosalbino y Scavino, 2015).

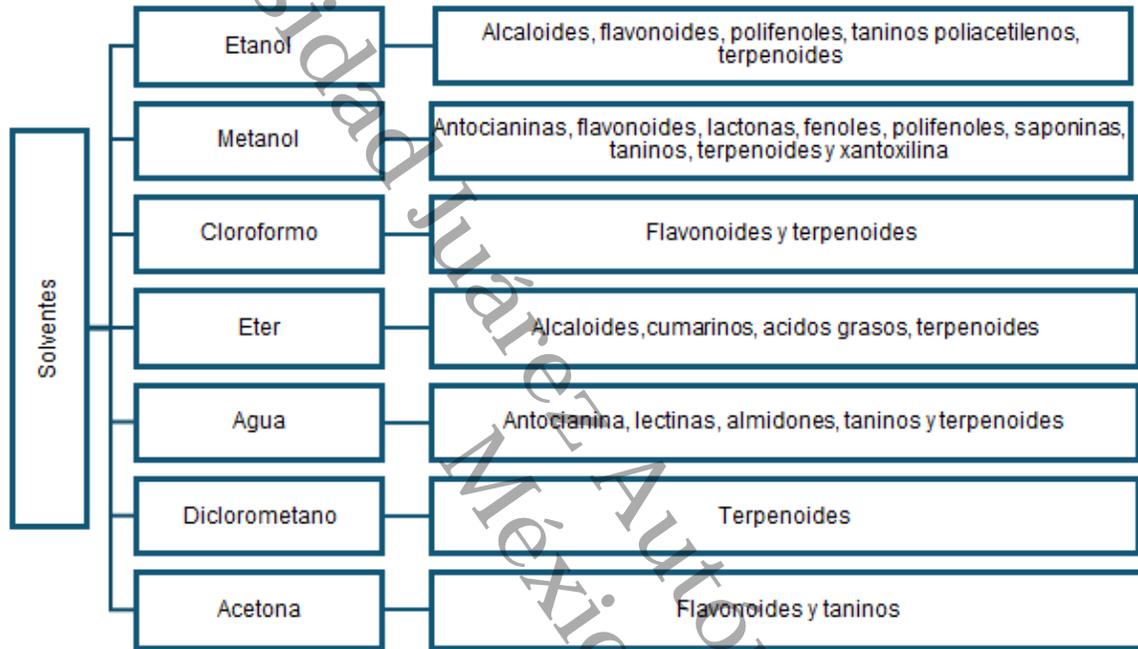
2.2.2 Inhibidores Orgánicos

Los inhibidores orgánicos son utilizados con mayor frecuencia debido a sus características amigables con el medio ambiente, que son de bajo costos y de fácil extracción de compuestos. La extracción de los compuestos orgánicos depende de varios factores entre ellos: la selección de la planta (hojas, tallo, fruta, flores, aceites), pretratamiento de la muestra antes de la extracción, la selección del solvente, temperatura de extracción, proceso de filtrado o centrifugado y/o secado (Ortega et al., 2021; Sharma et al., 2022).

En la Figura 2 se muestran los disolventes de extracción y los posibles compuestos activos resultantes de la extracción dependiendo del tipo de la planta (Badawi y Fahim, 2021; Koursaoui et al., 2021).

Figura 2

Compuestos encontrados en la extracción utilizando diferentes solventes



Nota: Solo se muestran compuestos encontrados en la literatura (Verma et al., 2018).

Generalizando la Ecuación de las sustancias orgánicas en H₂O resulta la siguiente Ecuación 4.



En la Ecuación 4 se muestra la adición de la sustancia orgánica al agua, se crea una solución de dicha sustancia en el volumen de agua y posteriormente el agua que se encuentra adsorbida sobre el metal produce la adsorción de la sustancia orgánica sobre la superficie del metal (Tamalmani y Husin, 2020).

2.3 Mecanismos de Corrosión

De acuerdo con el comportamiento del inhibidor en la superficie del metal sigue dos procesos: a) el transporte del inhibidor hacia la superficie del metal y b) la interacción del inhibidor - superficie del metal (adsorción) que afectan al metal. En la Figura 3 se muestra el proceso de la película que se forma en el metal.

Figura 3

Mecanismo de corrosión sin aplicación de inhibidor y con aplicación del inhibidor



Nota: Los espacios en blanco son las secciones corroídas mientras que las imágenes de color café simulan la presencia del inhibidor (Kurtela et al., 2020).

En las Ecuaciones 5-8 se pueden observar las reacciones de la disolución del metal en presencia de iones cloruro.



En las Ecuaciones 9-11 se muestra el desprendimiento de hidrógeno sobre el metal



2.3.1 Inhibidores de Corrosión en Soluciones Alcalinas

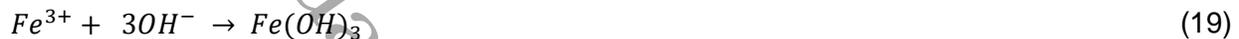
De acuerdo con el comportamiento del inhibidor en la superficie del metal en solución acuosa del NaCl, el metal sufre un mecanismo de reacción de oxidación formando iones ferrosos (Fe^{2+}) y férricos (Fe^{3+}) según las Ecuaciones 12, 13, 14 y 15.



Las especies intermedias reaccionan con el H₂O produciendo soluciones corrosivas como las Ecuaciones 16 y 17:



De las Ecuaciones 18 y 19 también pueden ocurrir reacciones catódicas por la reacción de iones hidróxidos:

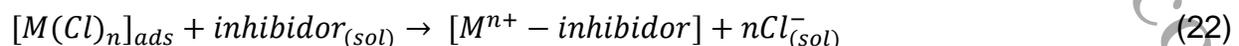


2.3.2 Efecto Sinérgico Sobre los Inhibidores de Corrosión

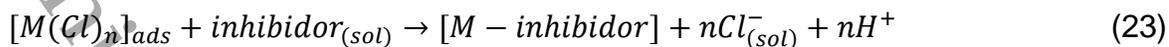
El fenómeno del sinergismo se ha desarrollado sustancialmente en distintos medios electrolitos como en el medio ácido y medio alcalino. Se ha demostrado que el rendimiento de inhibición de varios compuestos orgánicos e inorgánicos son influenciados por la presencia de aditivos, debido a la adsorción de moléculas inhibidoras en las interfaces metal/electrolito que forman una barrera protectora que surge debido a las fuerzas de adhesión que actúan entre ellos y la superficie metálica en comparación con las fuerzas que actúan entre el electrolito y superficie metálica (Devikala et al., 2019; Verma et al., 2017). La oxidación de los metales en el ánodo da como resultado la formación de cationes metálicos como se muestra en la Ecuación 20. El fenómeno del sinergismo se ha desarrollado sustancialmente en distintos medios electrolitos como en el medio ácido y medio alcalino. Se ha demostrado que el rendimiento de inhibición de varios compuestos orgánicos e inorgánicos son influenciados por la presencia de aditivos, debido a la adsorción de moléculas inhibidoras en las interfaces metal/electrolito que forman una barrera protectora que surge debido a las fuerzas de adhesión que actúan entre ellos y la superficie metálica en comparación con las fuerzas que actúan entre el electrolito y superficie metálica (Devikala et al., 2019; Verma et al., 2017). La oxidación de los metales en el ánodo da como resultado la formación de cationes metálicos como se muestra en la Ecuación 20.



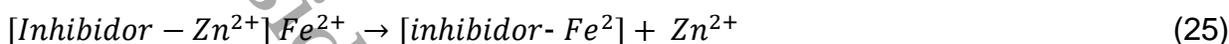
Los cationes metálicos reaccionan con el cloruro y con las moléculas inhibidoras contenidas en el electrolito:



Para componentes orgánicos que contienen hidrógeno se generaliza la Ecuación 23 (Qihui et al., 2023).



La presencia de cationes metálicos mejora la adsorción de los inhibidores mediante el sinergismo, como se indica en las Ecuaciones 24- 26.



2.4 Inhibidores Organicos a partir de Extractos de Plantas

El interés por los inhibidores organicos (verdes) de corrosión es por ser biodegradables debido a que por naturaleza se descompone sin ser dañino al medio ambiente, provocando la reducción del impacto ecológico y dando como respuesta a las restricciones regulatorias que hay por el uso de inhibidores químicos por ser tóxicos. Lo que hace que el inhibidor verde de corrosión sea una opción viable y sostenible (Ji et al., 2015b; Majeed y Deepak, 2018). Estudios preliminares en donde se han utilizado diferentes plantas y frutos, para diferentes tipos de acero al carbono en ácido clorhídrico (HCl), se citan a continuación en la Tabla 1.

Tabla 1

Estudios preliminares de extractos de plantas en medio ácido

Planta	Nombre común	Solvente	Eficiencia %	Concentración	Tipo de inhibidor	Referencia
<i>Rollinia occidentalis</i>	Biribá	Metanol	85.7	1.0 g/L	Mixto	(Álvarez et al., 2018)
<i>Oryza sativa</i>	Arroz	Metanol	88.0	1000 ppm	Mixto	(Prabakaran et al., 2017)
<i>Tragia plukenetii</i>	Tragia	Metanol- agua	88.0	500 ppm	Mixto	(Prabakaran et al., 2016a)
<i>L.Citruina</i>	Cáscara de sandía	Agua	90.20	1000 ppm	Mixto	(Odewunmi et al., 2015)
<i>Olea europaea</i>	Hojas de olivo	Metanol- agua	89.24 88.84 89.83	1400 ppm	Mixto	(Bouknana et al., 2015a)
<i>Capsella bursa-p.</i>	Bolsa de pastor	Alcohol etílico	97.0	60 mg/L	Mixto	(Hu et al., 2015)

También se han reportado estudios preliminares con otras plantas para diferentes muestras de acero al carbono en soluciones de NaCl utilizando inhibidores verdes de corrosión, en la Tabla 2 se citan a continuación:

Tabla 2

Estudios preliminares de extractos de plantas en medio alcalino

Planta	Concentración del NaCl	Eficiencia %	Concentración del extracto	Tipo de inhibidor	Referencia
Paja de arroz	3.5% NaCl	92%	1500 ppm	Mixto	(Othman et al., 2019)
<i>Thymus satureoides</i>	3% NaCl	82	1600 ppm	Anódico	(Simescu et al., 2023)
<i>Opuntia dillenii</i>	3% NaCl	93	750 ppm	Mixto	(Malak et al., 2023)
<i>Catharanthus roseus</i>	3% NaCl	70	5 mg/mL	Mixto	(Palaniappan et al., 2020)
<i>Kalanchoe blossfeldina</i>	3,5% NaCl+16 ppm Na ₂ S	92.6	300 ppm	Mixto	(Mohammed et al., 2022)
<i>Santolina chamaecyparissus</i>	3,5% NaCl	86,9	1,0 gL ⁻¹	Mixto	Shabani y Ghandchi, 2015)
	0.5% NaCl	66%	1000 mg/L	Mixto	(Ogwo et al., 2023)

Es por ello que, para éste estudio se selecciono la hoja de maguey morado conocida como *Tradescantia spathacea* y a la cáscara de plátano conocida como *Musa paradisiaca* como inhibidores verdes de corrosión.

2.4.1 La Musa Paradisiaca (Cáscara de Plátano)

Del género *Musa* y familia de las musáceas (Figura 4), la planta puede medir de 2 a 3 metros de altura, está compuesto por raíces, pseudotallo, fruto, y hojas. El 95 % de las cáscaras de plátano no se aprovechan son consideradas como desechos, ya que su enfoque es el consumo alimentario y comercialización de éste (Verma et al., 2018a).

La composición química del plátano es 30% de cáscara de la pulpa ricos en antioxidantes. Rita et al. (2023), mostraron que la *Musa paradisiaca* contiene metabolitos secundarios con tendencia a propiedades antibacterianas que pueden ser contenidos de flavonoides, alcaloides, saponinas, terpenoides y taninos (Rita et al., 2023).

Figura 4

Planta de Musa paradisiaca



Nota: Imagen tomada en el municipio de Cunduacán, Tabasco.

En el caso de *Musa paradisiaca* se han realizado estudios como los de Ji, et al. (2015), que analizaron la capacidad de inhibición del extracto acuoso de la cáscara en HCl. Utilizaron cáscaras de tres tipos; verde, madura y de maduración alta, demostraron que es mejor utilizar la cáscara verde. Con la técnica de Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIE), encontraron eficiencias en el rango de 81 a 89 \pm 4.04 % y con la técnica de Polarización Potenciodinámica (PPD), se mostró eficiencia en el rango de 82 % a 90 % \pm 4.04, clasificaron al inhibidor como anódico. Además, afirma que el potencial de inhibición se debe al contenido de moléculas de galocatequina ($C_{15}H_{14}O_7$) y catechin ($C_{15}H_{14}O_6$) (Ji et al., 2015). Estudios de Ramananda, et al. (2011) realizados con extracto de la hoja de *Musa paradisiaca* en H_2SO_4 en concentraciones de 3 g/L y a partir de las mediciones de PPD a temperaturas de 298, 308, 318 y 328 K, de acuerdo con las temperaturas encontraron eficiencias del 81.9 % a 57.8 % \pm 7.05, mostrando que al incrementarse la temperatura disminuye la eficiencia, el mecanismo de inhibición reportado es de tipo mixto (Mayanglambam et al., 2011). Rosliza et al. (2021) también

evaluaron el extracto de la hoja de *Musa paradisiaca* en agua recolectada en un ambiente marino. A partir de las mediciones de PPD, utilizaron concentraciones de 0-1000 ppm del extracto, encontraron una eficiencia en el rango de 66.19 - 86.51 % en tiempos de inmersión de 30 minutos, lo clasificaron como inhibidor tipo mixto (Rosliza et al., 2021). Estudios de Cheirmakani et al. (2019) estudiaron el polvo del extracto de la cáscara de *Musa paradisiaca* en HCl y obtuvieron eficiencias máximas del 87% en concentraciones de 500 ppm (Cheirmakani et al., 2019).

2.4.2 La Tradescantia Spathacea (Maguey Morado)

Es una planta del sureste mexicano (Figura 5) que se conoce también como maguey morado que se caracteriza por tener propiedades nutricionales, sensoriales, que se usa como preventivo en tratamientos medicinales, además de ser rico en antioxidantes específicamente fenoles y flavonoides (Verma et al., 2018b). No se encontraron reportes de registros de la *Tradescantia spathacea* como inhibidores de corrosión para el retardo de las velocidades de corrosión en el acero SAE 1010 en medio ácido o medio alcalino.

Figura 5

Planta de la Tradescantia spathacea



Nota: Se muestra una planta de ornato tomada en el municipio Centro, Tabasco.

En el desarrollo de esta investigación se puede dar un valor agregado a la hoja de *Tradescantia spathacea* (EHTS) para potencializar su valor económico y desarrollo de la producción en el sureste de México. Es una planta de fácil propagación por esquejes o por semillas, no requiere de muchos cuidados para su crecimiento, esta planta solo se utiliza como de ornato y para algunas aplicaciones medicinales, en el caso de la *Tradescantia spathacea* en el inicio de la investigación no se encontraron publicaciones para describir el comportamiento de la planta. La primera publicación fue en el 2023 con el título: “*Tradescantia spathacea*: New green corrosion inhibitor for SAE 1010 steel in acid médium” (Torres et al, 2023).

2.5 Técnicas Electroquímicas

Las técnicas electroquímicas permiten conocer el mecanismo de inhibición de la corrosión, velocidad de corrosión, tipo de inhibidor y determinar la eficiencia de inhibición. Estas técnicas pueden ser espectroscopía de impedancia electroquímica, ruido electroquímico, polarización potenciodinámica, modulación de frecuencia electroquímica. Estos estudios consisten en realizar perturbaciones de potencial, corriente o potencial-corriente (Sharma et al., 2022; El Haddad y Fouda, 2021).

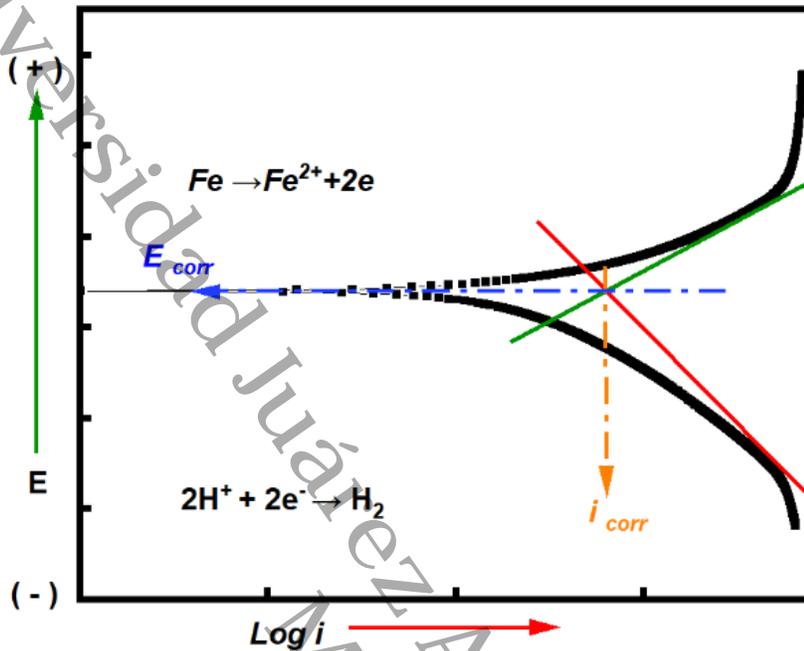
2.5.1 Potencial a Circuito Abierto

Conocido como potencial de corrosión, potencial de reposo y potencial de corrosión libre. Es una evaluación a un sistema de potencial entre la superficie de un electrolito con el electrodo de referencia. Se usa cuando se requiere relacionar otras mediciones del mismo fenómeno y determinar la región activa o pasiva del metal a evaluar. Esta técnica mantiene el metal o el acero en potenciales pasivos y es capaz de controlar el sistema de protección catódica y anódica. Esta técnica puede predecir el tipo de corrosión como corrosión uniforme, pasividad, corrosión bajo tensión y corrosión por picadura gracias a los resultados de potenciales (Kushwah y Pathak, 2020; Obregon et al., 2023).

2.5.2 Polarización Potenciodinámica (PPD)

En la técnica de polarización potenciodinámica se obtienen las curvas de Tafel (Figura 6), donde se representa el potencial (E) con el logaritmo de la densidad de corriente ($\text{Log } i$), en esta técnica el metal se estabiliza para alcanzar un potencial constante en las semireacciones electroquímicas (semireacciones anódicas y catódicas) y posteriormente, se aplica un barrido de potencial que puede variar de 0.2-0.3 V para dar respuesta en unidades de corriente (Rosalbino y Scavino, 2015).

Figura 6
Diagrama de Tafel



Nota: En la parte superior se muestra la región catódica y en la inferior se muestra la región anódica.

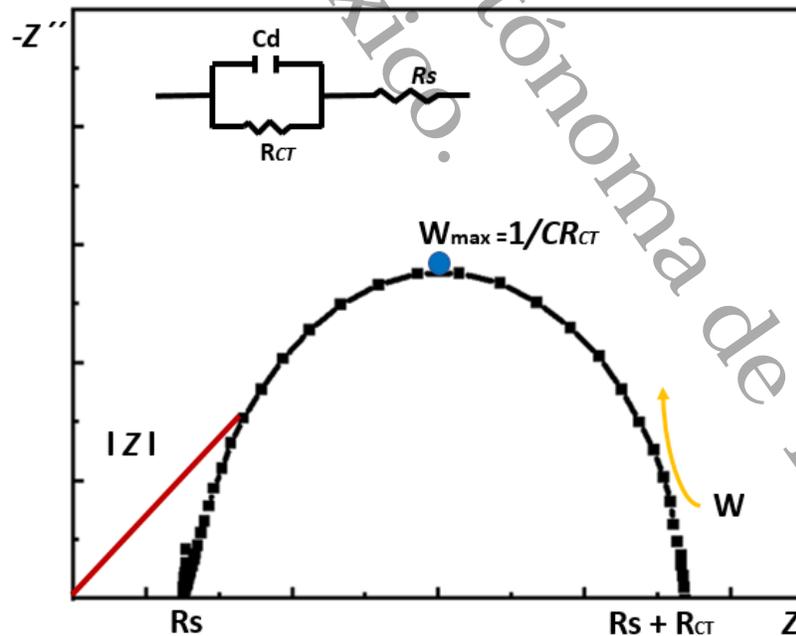
Con esta técnica se puede determinar el tipo de inhibidor: anódico, catódico o mixto. Los inhibidores anódicos o inhibidores pasivantes, son los responsables de disminuir la velocidad de semirreacciones anódicas (los inhibidores son oxidantes) que tienden a inhibir la reacción anódica favoreciendo la formación de capas en la superficie del metal para evitar la disolución del metal. Siendo que el potencial de corrosión (E_{corr}) del metal se desplaza hacia los valores de potenciales positivos (El Haddad y Fouda, 2021). Los inhibidores catódicos son los responsables de disminuir la velocidad de semirreacciones catódicas (actúan sobre la reacción de reducción). Siendo que en el potencial de corrosión (E_{corr}) del metal se desplaza hacia los valores de potenciales negativos (Zamani et al., 2021). Los inhibidores mixtos en su mayoría son compuestos orgánicos con respuesta de inhibir las reacciones anódicas y catódicas. Siendo que el potencial de corrosión (E_{corr}) del metal no se aprecia. Los inhibidores en fase vapor tienen las características de ser inhibidor temporal utilizado en ambientes cerrados específicamente en la aplicación de corrosión atmosférica (Bouknana et al., 2015a). El potencial varía con el $\log i$, mientras que la densidad de corriente (i_{corr}) alcanzará su máximo (Bouknana et al., 2015b; Saraswat y Yadav, 2020).

2.5.3 Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIE)

Esta técnica consiste en aplicar un potencial alterno para producir corriente alterna para polarizar el elemento sensor. Para estudios de corrosión esta técnica permite realizar diagramas de Nyquist que es un método gráfico analítico que determina la estabilidad de un sistema que se estudia y que se pueden ajustar a potenciales de circuito eléctrico equivalentes (CEE), que consta de resistencia a la solución (R_s), resistencia de transferencia de carga (R_{CT} por sus siglas en inglés) y la capacitancia de la doble capa (C_d por sus siglas en inglés), con los datos que se obtiene de R_{CT} , en relación de la impedancia real ($Z_r=Z'$) con la impedancia imaginaria ($Z_j=Z''$) de un sistema como se muestra en la Figura 7, también se puede conocer la eficiencia empleando algunos cálculos (Kwolek et al., 2021; Liu et al., 2019; Khanari y Finsgar, 2019b). La impedancia de la doble capa aumenta con el aumento de la concentración del inhibidor, lo que puede atribuirse a un aumento de la resistencia a la corrosión, ya que el proceso de transferencia de carga se retarda al aumentar la concentración del inhibidor (Oloketuyi y Khan, 2017; Saraswat y Yadav, 2020).

Figura 7

Diagrama de Nyquist



Nota: El diagrama de Nyquist es la gráfica de semicírculo de la parte inferior, mientras el diagrama de CEE es el que se muestra en la parte superior.

2.6 Técnica de Pérdida de Peso

La técnica de pérdida de peso es la prueba más común que consta en exponer el material de interés para el estudio en un medio agresivo, por algún tiempo determinado. Al exponer el material, éste pierde parte del propio material debido a la disolución o a la formación de productos de oxidación en la superficie de la materia (Zouitini et al., 2018).

Esta técnica consiste en la diferencia de peso antes de exponer y después de exponer el material al medio agresivo. Es importante tener presente que la velocidad de corrosión del material expuesto es variable debido a que puede cambiar en la etapa del ataque al material. El estudio de pérdida de masa en el material sin y con inhibidor es para determinar solo la efectividad del inhibidor, la cobertura de la superficie y la tasa de corrosión (Adejo et al., 2018; Liu et al., 2019).

2.7 Isotermas de Adsorción

Son modelos matemáticos que se utilizan para estimar la concentración de iones o moléculas inhibidoras en la adsorción de la superficie del metal o acero, dando como resultado el mecanismo de adsorción, eficiencia de corrosión y parámetros termodinámicos. Algunos modelos de adsorción utilizados en el fenómeno de corrosión son; Frumkin, Flory-Huggins, Dhar-Flory-Huggins, Langmuir, Temkin y Freundlich (Osaribie et al., 2019; Kwolek et al., 2021; Hou et al., 2022). Para éste estudio solo se mencionarán las isotermas de adsorción usadas para éste trabajo.

2.7.1 Isoterma de Langmuir

La isoterma de Langmuir indica la adsorción de una monocapa que es una relación de la densidad superficial adsorbida y la concentración de moléculas, además el número de sitios (total) corresponde al número de moléculas que son adsorbidas en la superficie del metal quedando protegido por la formación de una capa o película, estas isotermas indican que es homogénea la superficie del adsorbente. El modelo de adsorción está dado por la Ecuación 27 que muestra la relación de la concentración y la cobertura de superficie (He et al., 2024).

$$C_{inh}K_{ad} = \left(\frac{\theta_{eq}}{1 - \theta_{eq}} \right) \quad (27)$$

Donde:

C_{inh} : concentración del inhibidor, K_{ads} : constante de equilibrio para el proceso de adsorción y θ : cobertura de la superficie a concentraciones específicas.

2.7.2 *Isoterma de Freundlich*

La isoterma de Freundlich se adapta a un sistema donde la adsorción se comporta en múltiples capas conocidas como multicapas que es la relación de la concentración del soluto que se adsorbe en la superficie del metal con la concentración del soluto en el que está inmerso, la superficie del metal se considera heterogénea y que su sitio es ocupado de mayor a menor afinidad, ese tipo de isoterma estudia la relación de la fase de solución y el equilibrio de adsorción como la Ecuación 28 (Umoren et al., 2016; Na Chongzheng, 2020).

$$\theta = K_{ads} C_{inh}^n \quad (28)$$

Donde: θ : cobertura de la superficie y n : $0 < n < 1$

2.7.3 *Isoterma de Temkin*

La isoterma de Temkin es la relación que hay entre el adsorbato y el adsorbente, se caracteriza que las energías se distribuyen uniformemente hasta lograr el valor máximo de energía, incluso esta energía disminuye de forma lineal con la cobertura superficial y que no es constante la adsorción de las moléculas con la superficie, esta isoterma indica que es heterogénea la superficie del adsorbente. El modelo de Temkin está dado por la Ecuación 29 (Gao et al., 2020).

$$K_{ads} C_{inh} = e^{g\theta} \quad (29)$$

Donde g : constante de interacción adsorbente-adsorbato.

III. JUSTIFICACIÓN

Uno de los principales métodos para combatir la corrosión interior es el uso de inhibidores orgánicos para controlar los efectos de la corrosión en el interior de ductos de algún proceso industrial. La corrosión por picaduras es una de las formas de corrosión que se consideran como destructiva y difícil de identificar en los metales debido al contenido de iones agresivos. Esta se presenta por la formación de cavidades en una superficie que no revela el ataque inmediatamente (Othman et al., 2019; Zhang, 2021). El pequeño tamaño de la picadura y la mínima cantidad de metal que se disuelven al formarla, hacen que la detección de esta forma de corrosión sea muy difícil en las etapas iniciales (Czaban, 2018; Oyewole et al., 2021). El interés de mitigar los procesos de corrosión da apertura a un tema relevante, con la intención de conservar y preservar las propiedades de materiales metálicos, al remplazo total o parcial de piezas corroídas generan altos costos, así como garantizar la seguridad (Prabakaran et al., 2016a; Zhu y Zi, 2017; Álvarez et al., 2018), pues estos pueden llevar a pérdidas humanas y contaminación al medio ambiente. Los inhibidores de corrosión retardan el proceso de corrosión, incrementan el comportamiento de la polarización anódica y/o catódica, minimizando el movimiento o difusión de los iones en la superficie metálica (Prabakaran et al., 2016; Berezhnaya et al., 2021).

Por lo tanto, en la presente investigación se investigaron dos extractos de productos naturales: *Tradescantia spathacea* y *Musa paradisíaca* extraídos con una solución etanol/agua 4:1, a diferentes concentraciones en medio ácido y alcalino, utilizando aditivos sinérgicos

IV. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN E HIPÓTESIS

4.1 Pregunta de investigación

¿Como influyen el comportamiento de las isothermas de adsorción en las eficiencias de los extractos naturales en los diferentes tiempos de inmersión en solución acida y alcalina?

4.2 Hipótesis

Los compuestos obtenidos de la *Tradescantia spathacea* (maguey morado) y de la *Musa paradisiaca* (cáscara de plátano) tendrán efecto inhibidor de corrosión en metales en el medio ácido y medio alcalino, y agregando aditivos sinérgicos a los compuestos extraídos aumentarán el porcentaje de eficiencia.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

V. OBJETIVO

5.1 Objetivo General

Desarrollar diferentes composiciones inhibidoras a partir de productos naturales (cáscara de plátano- *Musa paradisiaca* y maguey morado-*Tradescantia spathacea*) y agregando aditivos sinérgicos (KI), para evaluar su eficiencia en la inhibición a la corrosión en medios ácidos y alcalinos.

5.2 Objetivos Específicos

Objetivo específico 1: Obtener extractos de *Musa paradisiaca* y *Tradescantia spathacea* por extracción soxhlet utilizando un solvente (etanol/agua).

Objetivo específico 2: Analizar los extractos obtenidos con técnicas de; Espectroscopía de Transmisión de Infrarrojo con Transformada de Fourier (FTIR), Espectrofotometría Ultravioleta-Visible (UV-Vis), y Cromatografía de gas acoplada con Espectrometría de Masas (GC/MS).

Objetivo específico 3: Evaluar con técnicas electroquímica la acción inhibidora de los extractos en medio ácido y alcalino.

Objetivo específico 4: Determinar el modelo de adsorción que más se ajusta con los datos obtenidos por las técnicas electroquímicas.

Objetivo específico 5: Evaluar con técnicas electroquímicas las formulaciones del extracto con el KI con vistas a evaluar posibles efectos sinérgicos.

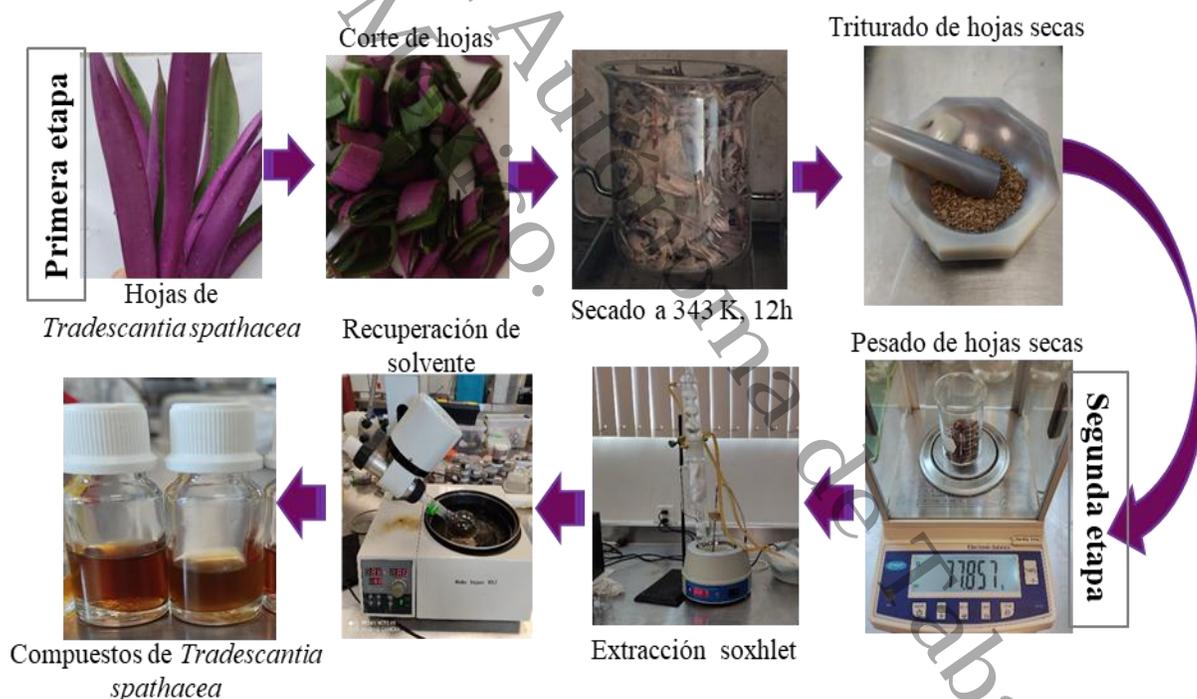
VI. METODOLOGÍA

6.1 Preparación del inhibidor de EHTS y ECMP

La extracción de compuestos de los extractos se realizó en dos etapas, tanto para el EHTS como el ECMP. En la Figura 8, se muestra la metodología utilizada para el EHTS en la primera etapa, se lavaron las hojas de *Tradescantia spathacea* y posteriormente, se realizaron cortes de aproximadamente 1x4 cm, se secó en un horno a 70 °C por 12 h, luego se trituró la muestra en un mortero de ágata. En la segunda etapa se preparó la extracción de compuestos usando el método soxhlet por 8 h, usando como como solvente una mezcla de etanol-agua desionizada en relación 4:1 (v/v). Posteriormente, se recuperó el solvente con un rotovapor R-52, (Ogunleye et al., 2020a; Zakeri et al., 2022).

Figura 8.

Extracción de compuestos de la hoja de Tradescantia spathacea



Nota: El solvente recuperado en el rotavapor es del 90%, el resto se evapora en el ambiente.

En la Figura 9 se muestra la misma metodología utilizada para el ECMP, que se dividen en primera y segunda etapa para la extracción de los compuestos (Marlianto y Ramadhani, 2020; Muthukumarasamy et al., 2022).

Figura 9

Extracción de compuestos de la cáscara de Musa paradisiaca



Nota: El solvente recuperado en el rotavapor es del 90%, el resto se evapora en el ambiente.

En la Tabla 3, se muestra el diseño experimental para el EHTS, en donde se aplicaron las técnicas electroquímicas en diferentes concentraciones del extracto y en diferentes tiempos de inmersión del metal de $T_1=1$ h, $T_2=24$ h y $T_3=48$ h.

Tabla 3*Diseño experimental para el EHTS*

Factor		Efectos							Respuestas	
Técnicas electroquímicas	A: Concentraciones	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	Eficiencia Tipo de inhibidor
	B: Tiempo de inmersión .	T ₁								
		T ₂								
T ₃		T ₃								

Nota: En éste diseño la concentración varían hasta 1400 ppm.

En la Tabla 4, se muestra el diseño experimental para el ECMP, en donde se aplicaron las técnicas electroquímicas en diferentes concentraciones y en diferentes tiempos de inmersión del metal.

Tabla 4*Diseño experimental para el ECMP*

Factor		Efectos						Respuestas	
Técnicas electroquímicas	A: Concentraciones	0	200	400	600	800	1000	1200	Eficiencia Tipo de inhibidor
	B: Tiempo de inmersión .	T ₁							
		T ₂							
T ₃		T ₃							

Nota: En éste diseño la concentración varían hasta 1200 ppm.

6.2 Caracterización de los Inhibidores

Después de realizar la extracción de compuestos con el método soxhlet, se caracterizaron por Cromatografía de gases en un equipo acoplado a un espectrómetro de masas (GC-MS), marca Shimadzu modelo GCMS-QP2010 ultra, con columna capilar (5%-fenil-95% dimetilpolisiloxano) de 30 m x 0.25 mm i.d., 0.25 μm de espesor de película, con gas helio a 1.5 mL/min, para identificar los compuestos presentes en el EHTS y ECMP.

6.2.1 Espectroscopía UV-Visible

Se empleó un espectrofotómetro ultravioleta-visible (UV-Vis) marca Shimadzu, modelo 1280 para el análisis de las muestras de EHTS y ECMP, para obtener información de las bandas de adsorción. Se mezcló 1 ml del extracto en 10 ml de agua desionizada, la muestra se colocó en una celda de cuarzo, se registró la lectura en el rango de longitud de onda de 190 a 1100 nm.

6.2.2 Espectroscopía FTIR

La caracterización estructural del EHTS y ECMP, se analizó mediante el uso de espectroscopía FT-IR con un equipo Thermo Scientific modelo Nicolet IS50 en rangos de 400-4000 cm^{-1} , para determinar sus constituyentes químicos y grupos funcionales de los compuestos orgánicos más abundantes del inhibidor e identificador mediante la frecuencia de vibración.

6.3 Estudio de Pérdida de Peso

En la Figura 10 se muestran los pasos para la elaboración de los electrodos de trabajo en donde se utilizó acero al carbono SAE 1010, tiene una composición en peso de 0.13% C, 0.02% Si, 0.010% Cr, 0.52% Mn, 0.50 % Al, 0.11% P, 0.010% Cr y 98.7% Fe. Para las pruebas de pérdida de peso, las muestras del acero fueron pulidos con papel de carburo de silicio (SiC) en diferentes tamaños de grano desde 600 a 1500, lavados con agua destilada, desengrasado con acetona y posteriormente, se colocaron en un baño ultrasónico por 10 min para eliminación de residuos, lavados con acetona y secado a temperatura ambiente, con el fin de mantenerlos libres de humedad se guardaron dentro de un desecador.

Figura 10

Pasos de elaboración del electrodo de trabajo

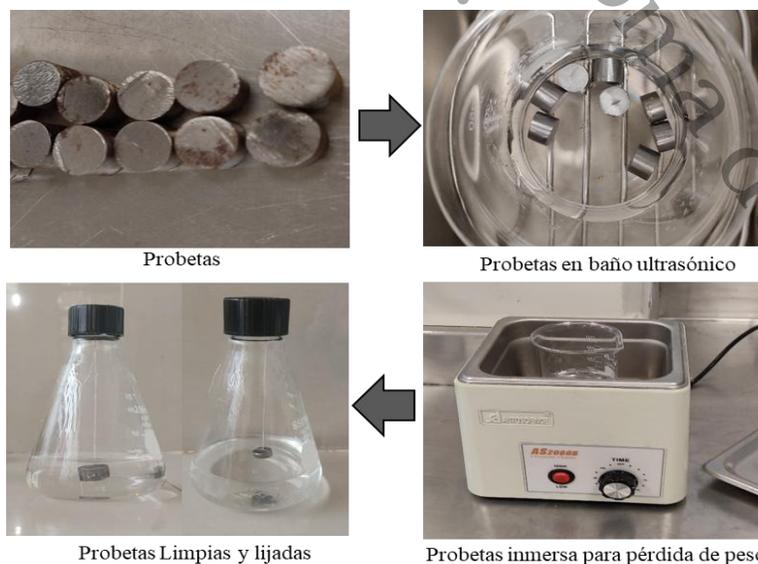


Nota: El secado del encapsulado se realizo a temperatura ambiente.

Para realizar las pruebas gravimétricas, se pesaron las probetas antes y después de ser expuestas en el medio corrosivo. La prueba se realizó en matraces Erlenmeyer a los cuales se le colocaron 100 ml de solución de HCl a 1 M y el metal (probeta) previamente pulidas y limpias, a cada matraz se le agregaron concentraciones de extractos de 0, 200, 400, 600, 800, 1000 y 1200 ppm, por 6 días de inmersión a temperatura ambiente como se muestra en la Figura 11 (Hartl et al., 2020).

Figura 11

Estudio de pérdida de peso (PP): a) Probetas, b) Limpieza de las probetas, c) Probetas inmersas en el baño ultrasónico, d) Probetas limpias y lijadas



Nota: Las probetas se conservan en un desecador para evitar se agrave el proceso de corrosión.

Después del tiempo de inmersión se lavaron con agua desionizada, agua jabonosa y acetona, se colocaron en un desecador por 1 h. La diferencia de peso se utilizó para estimar la eficiencia de inhibición (IE %) con las Ecuaciones 30 y 31.

$$V_{corr} = \left(\frac{\Delta m}{S \times t} \right) \quad (30)$$

$$IE (\%) = \left(\frac{V_{corr} - V'_{corr}}{V_{corr}} \right) \times 100 \quad (31)$$

Donde:

$\Delta m = m_1 - m_2$ (mg), m_1 : masa inicial, m_2 : masa final, S : area de la muestra (cm^2), t : tiempo de inmersión (min), V_{corr} : velocidad de corrosión del blanco, V'_{corr} : velocidad de corrosión con inhibidor.

6.4 Pruebas Electroquímicas

Las pruebas electroquímicas se realizaron utilizando el equipo potenciostato-galvanostato 128-PGSTAT, con una celda de tres electrodos, que consta de un electrodo de referencia de calomel, un contraelectrodo de platino y un electrodo de trabajo y como electrolito se usó la disolución de agua destilada- HCl a 1 M, para simular el medio ácido en el que están expuestos los metales a temperatura constante de 298 K, en tiempos de inmersión de 1 h (t_1), 24 h (t_2) y 48 h (t_3).

Antes de iniciar los experimentos, el sistema electroquímico se estabilizó en tiempos de 30 min, un punto por segundo para alcanzar un potencial constante de circuito de potencial abierto (OCP).

Los ensayos de polarización potenciodinámica (PPD), se realizaron en rango de ± 0.250 V a velocidad de 1 mV/s con respecto al potencial a circuito abierto (OCP). Se evaluaron los porcentajes de eficiencias ($\% \eta$) con la Ecuación 32.

$$\% \eta = \frac{I^0_{corr} - I^i_{corr}}{I^0_{corr}} \times 100 \quad (32)$$

Donde:

I^0_{corr} = densidad de corriente sin inhibidor, I^i_{corr} = densidad de corriente con inhibidor.

La espectroscopía de impedancia electroquímica (EIE) se realizó en el rango de frecuencia de 10000 Hz a 0.01 Hz, con señal de 20 mV a 10 puntos por década. Se utilizó el software Zsim para hacer los ajustes de EIE, cada experimento se realizó por triplicado, con los datos obtenidos se calculó la eficiencia de acuerdo con la Ecuación 33, para los 3 tiempos de inmersión.

$$\% \eta = \frac{R_{p\text{inh}} - R_{p\text{blan}}}{R_{p\text{inh}}} \times 100 \quad (33)$$

Donde:

$\% \eta$: eficiencia del inhibidor, R_{pblan} : Resistencia de polarización calculada por EIE, R_{pinh} : Resistencia de polarización calculada por EIE a una concentración determinada de inhibidor.

6.5 Isotermas de Adsorción

Las isotermas de adsorción son utilizadas para la interpretación de las posibles formas de adsorción de las moléculas de efecto inhibidor en el metal. Para predecir el mecanismo de inhibición de corrosión del EHTS y del ECMP con la superficie del acero SAE 1010, se utilizaron los modelos de adsorción de Langmuir (Ecuación 34), Temkin (Ecuación 35) y Freundlich (Ecuación 36). Con los datos obtenidos en la técnica de extrapolación de Tafel o línea de polarización (PPD), técnica de impedancia electroquímica (EIE) y pérdida de peso (PP), los valores se ajustaron a los diferentes modelos de isotermas de adsorción que se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5.

Modelos de isotermas de adsorción para el EHTS

Modelo	Ecuación	Número de Ecuación
Langmuir	$\frac{C}{\theta} = \frac{1}{K} + C$	(34)
Temkin	$\theta = \frac{1}{f} \ln(KC)$	(35)
Freundlich	$\log \theta = n \log C_{inh} + \log K_{ads}$	(36)

Donde: C : concentración del inhibidor de EHTS, θ : cobertura de la superficie, K : constante de equilibrio, g = interacción del adsorbato.

El área de cobertura (θ) se utilizó para obtener la isoterma dependiendo de la concentración del extracto. El θ es proporcional al porcentaje de inhibición obtenida en las pruebas electroquímicas o de pérdida de peso. Los datos de la cobertura (θ) se ajustaron mediante un modelo lineal y por medias del coeficiente de correlación R^2 . La constante de equilibrio (K_{ads}) para la adsorción proceso se estimó a partir de la intercepción de la Ecuación 37, solo para la Isoterma de Langmuir.

$$K_{ads} = \frac{1}{y} \quad (37)$$

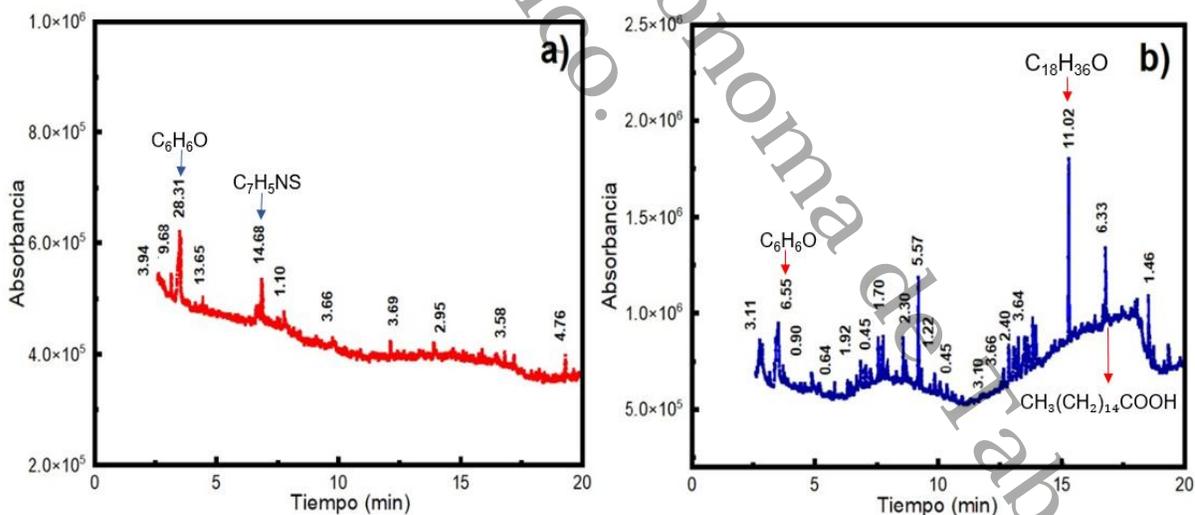
VII. RESULTADOS Y DISCUSIONES

7.1 Análisis de Cromatografía (GC-MS)

En la Figura 12a se muestran algunos compuestos obtenidos del análisis de los espectros de masa para el EHTS, en donde se observa que los compuestos con mayor porcentaje de área de la muestra son fenol (C_6H_6O) con 28.31% y benzotiazol (C_7H_5NS) con 14.68%, considerándolos como ingredientes activos. En la Figura 12b, se muestran algunos compuestos obtenidos del análisis de los espectros de masa para el ECMP, en donde se observa que los compuestos con mayor porcentaje de área en la muestra analizada son octadecanal ($C_{18}H_{36}O$) con 11.02%, ácido palmítico ($CH_3(CH_2)_{14}COOH$) con 6.33 y fenol (C_6H_6O) con 6.55%, que tienen características que indican que pueden ser un inhibidor de corrosión. De acuerdo con Rossella et al. (2023) los compuestos fenólicos tienen la capacidad de formar otros compuestos complejos, que protegen la superficie del metal, estos compuestos heterocíclicos forman películas protectoras en el metal disminuyendo la corrosión (Rossella et al., 2023).

Figura 12

a) Cromatografía GC-MS del EHTS y b) Cromatografía GC-MS del ECMP



Nota: El Compuesto fenol se presenta en la Cromatografía del EHTS y del ECMP.

En la Tabla 6 se muestran los compuestos presentes en la Cromatografía GC-MS del EHTS y en la Tabla 7 se muestran los compuestos presentes en la Cromatografía GC-MS del ECMP. También se observan otros compuestos que contiene elementos como nitrógeno, oxígeno y azufre, elementos que tienen propiedades inhibitoras (Li et al., 2021).

Tabla 6

Compuestos identificados por Cromatografía de gases (GC-MS) con detector de masas en el análisis del EHTS

Formula	Nombre	Tiempo de retención(min)	% Área
C ₆ H ₆ O	Fenol	3.498	28.31
C ₆ H ₈ O ₃	Furaneol	6.62	13.65
C ₇ H ₅ NS	Benzotiazol	6.856	14.68
C ₆ H ₈ N ₂ O	2,3-Diaminofenol	6.92	1.1
C ₉ H ₁₀ O ₂	Benzoato de etilo	7.758	3.66
C ₁₆ H ₃₂ O	Hexadecanal	15.893	2.95
C ₃ H ₈ O ₃	Glicerina	3.443	11.74
CH ₃ COO(CH ₂) ₁₁ CH ₃	Acetato de laurilo	12.14	11.63
C ₁₆ H ₃₄ O ₃	Dietilenglicol	17.193	3.58
	Éter monododecílico		
C ₁₇ H ₃₆ N ₂ O	Tetrabutílurea	19.313	4.76
C ₁₁ H ₁₆ O ₃	Loliolide (benzofurano)	3.143	3.94

Según Ogunleye et al. (2020), los compuestos extraídos de plantas que contienen grupos funcionales como; hidroxilo, fenoles y ácidos carboxílicos, son algunos compuestos que se consideran como inhibidores de corrosión (Ogunleye et al., 2020). Según Faiz et al. (2020) los alcaloides son compuestos nitrogenados, que se infiltran en ciertos sitios del metal, donde pueden adicionar a un protón H⁺ para dar lugar a una reacción química (quimisorción) y actuar como capa protectora en el metal (Faiz et al., 2020).

Tabla 7

Compuestos identificados por Cromatografía de gases (GC-MS) con detector de masas en el análisis del ECMP

Fórmula	Nombre	Tiempo de retención (min)	% Área
C ₁₀ H ₂₂ O	1-Decanol	2.867	3.11
C ₃ H ₈ O ₃	Propano-1,2,3-triol	3.415	6.4
C ₆ H ₆ O	Fenol	3.515	6.55
C ₄ H ₆ O ₃	Ácido acetoacético	3.706	0.9
C ₆ H ₁₀ O	Ciclohexanona	9.2	5.57
C ₁₄ H ₂₂ O	4-n-octilfenol	13.071	3.66
C ₃₁ H ₄₈ O ₂	Fitonadiol	13.612	3.44
C ₁₈ H ₃₆ O	Octadecanal	15.304	11.02
CH ₃ (CH ₂) ₁₄ COOH	Ácido palmítico	16.786	6.33
C ₁₈ H ₃₄ O ₂	Ácido oleico	18.54	4.18
C ₁₄ H ₂₂ O	Fenol, 4-(1,1,3,3-tetrametilbutil)-	12.87	3.1
C ₁₄ H ₂₂ O	4-Metil-2-terc-octilfenol	13.12	2.4
C ₁₈ H ₃₆ O	Ácido octadecanoico	18.75	1.46
C ₈ H ₁₀ O ₂	4-Fenol	6.86	1.92
C ₁₀ H ₁₈ O	Alfa-terpineol	6.45	0.64
C ₁₀ H ₂₀ O	Etoxicitronelal	7.66	0.45
C ₁₃ H ₁₈ O	Megastigmatrienona	10.69	0.45
C ₇ H ₅ NS	Benzotiazol	6.87	2.92
C ₂₁ H ₄₀ O	2-Hidroxi-2-metil-3-eicosino	20.319	2.88
C ₂₀ H ₂₆	3,4-Dimetil-3,4-difenilhexano	20.488	1.75

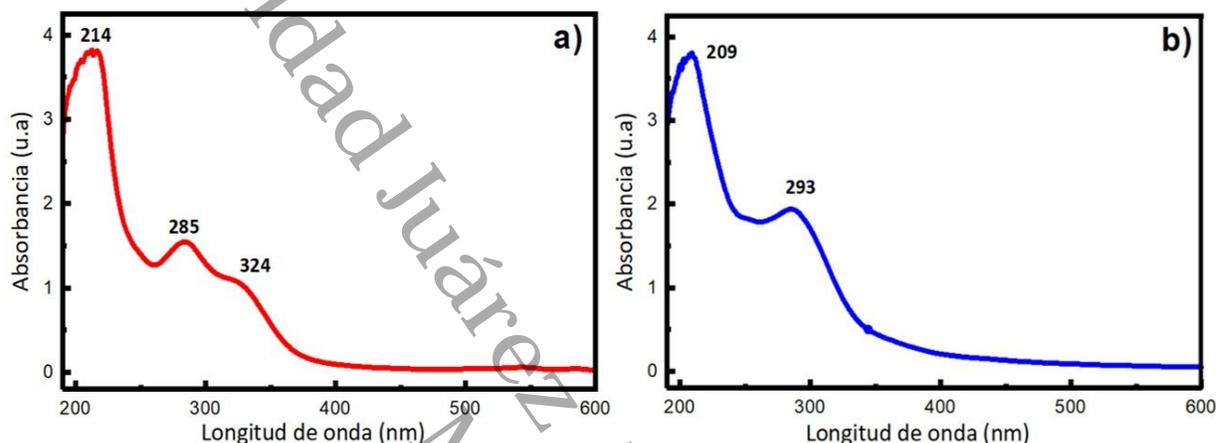
Se observan la presencia de otros compuestos que contiene elementos como nitrógeno, oxígeno y azufre, elementos que se consideran con propiedades inhibitoras (Li et al., 2021).

7.2 Análisis de UV-Vis

En la Figura 13a, se muestran el espectro de absorción del extracto de la hoja de *Tradescantia spathacea*. El espectrofotómetro del EHTS muestra tres picos principales en 214, 285 y 324 nm. Estudios de Begum et al. (2021), indica que en el rango de 200 a 400 nm hay presencia de nitrógeno y de oxígeno de los cuales son de importancia para el efecto inhibitor (Begum et al., 2021). En la Figura 13b, se muestran el espectro de absorción del

extracto de la cáscara de *Musa paradisiaca*. El espectro de ECMP muestra dos picos principales en 209 y 293 nm. Para los dos espectros se observaron presencia de picos entre la región de 200 a 400 nm.

Figura 13
Espectro UV-Vis del EHTS y del b) ECMP



Nota: las bandas de absorción para los dos extractos son similares en la longitud de onda.

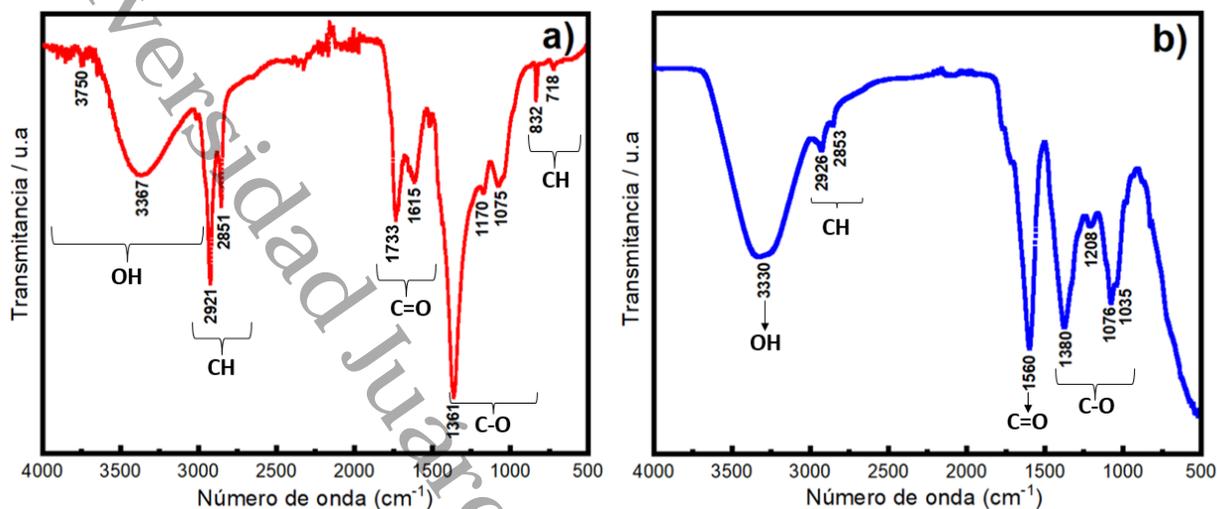
De los picos obtenidos en la Figura 13a y 13b, se puede determinar que las bandas de absorción en los compuestos orgánicos son asociadas con transiciones electrónicas en $\pi \rightarrow \pi^*$, $n \rightarrow \sigma^*$ y $n \rightarrow \pi^*$, siendo que para el orbital π^* son enlaces múltiples, mientras que para los orbitales n tienen pares de electrones libres (heteroátomos como O, N, S, y halógenos) con energía de carácter no enlazante σ^* , son orbitales antideslizantes con enlace en la región internuclear (Al-Amiery et al., 2020). El resultado de UV-Vis y de GC-MS, confirman la presencia de compuestos característicos de moléculas inhibitoras.

7.3 Análisis de Espectroscopía FTIR

La caracterización del extracto de hoja de *Tradescantia spathacea* (EHTS) de la Figura 14a y del extracto de cáscara de *Musa paradisiaca* (ECMP) de la Figura 14b, se muestra la espectroscopía de infrarrojo, en donde se observan picos característicos de varios compuestos.

Figura 14

Espectros de infrarrojo (FTIR) de los extractos estudiados como inhibidores verdes de corrosión del acero al carbón SAE 1010. a) EHTS y b) ECMP



Nota: En el rango de 1000 a 4000 se muestran los mismos grupos funcionales para los dos extractos.

Se observa una banda de adsorción en 3367 cm⁻¹ y en 3750 cm⁻¹, valores ubicado entre el rango 3000 cm⁻¹ y 3750 cm⁻¹ corresponden al estiramiento de OH, las señales apreciadas en el espectro de 2921 cm⁻¹ corresponde a un alcano, el pico de 2921 cm⁻¹ se refiere al estiramiento de C-H cm⁻¹, los picos en 1615 cm⁻¹ y 1733 cm⁻¹ corresponden al estiramiento del doble enlace C=O, grupos carboxilos y esterés, en el pico 1361 cm⁻¹, 1170 cm⁻¹ y 1075 cm⁻¹ corresponde al estiramiento C-O de compuestos fenólicos. Los picos ubicados en 832 cm⁻¹ y 718 cm⁻¹ que son picos pequeños en el rango de 900 cm⁻¹ y 500 cm⁻¹ corresponde a los anillos aromáticos (Torres et al., 2017; Jayakumar et al., 2020a; Manantapong et al., 2020b). Se observó picos en rangos similares que corresponden a los OH, CH, C=O, y CO. De acuerdo con los picos obtenidos, se puede mencionar que el EHTS tienen más contenidos de anillos aromáticos y compuestos fenólicos que se muestran en el espectro para el ECMP. Con éste análisis se confirma la presencia de los compuestos presentes en la Cromatografía de gases (GC-MS).

7.4 Análisis de Técnicas Electroquímicas en Medio Ácido con EHTS

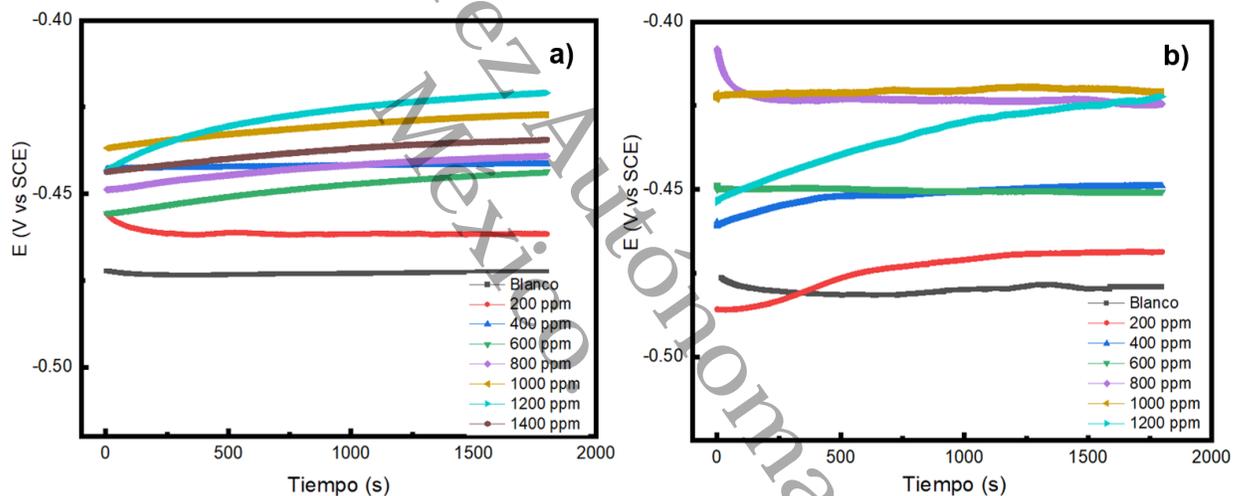
Para obtener más información del proceso de corrosión, se realizaron mediciones de polarización potenciodinámica (PPD) para determinar la velocidad de reacción catódica y anódica del acero al carbón SAE 1010 en ausencia y presencia del EHTS en HCl 1M a temperatura ambiente en tiempos de 1 h, 24 h y 48 h.

En las Figura 15a y 15b, se muestra el comportamiento del potencial a circuito abierto (OCP) para la solución de HCl (blanco) y para las soluciones de HCl con el inhibidor de EHTS a diferentes concentraciones de 200 a 1400 ppm, se observa que después de 15 minutos logra estabilizarse el sistema mientras que para el ECMP se observa que la estabilidad es variable para las diferentes concentraciones.

Estudios de Dhouibi et al. (2021), mencionan que el sistema logró estabilizarse después de 15 min, indicando que éste tiene las condiciones estacionarias de un circuito abierto (Dhouibi et al., 2021a). Además, según Schmitzhaus et al. (2020), el comportamiento del OCP es característico de inhibición de la corrosión en medio ácido (Schmitzhaus et al., 2020).

Figura 15

Mediciones de OCP de los extractos estudiados a) con EHTS y b) con ECMP



Nota: La diferencia de colores les corresponde a las diferentes concentraciones.

De acuerdo con la PPD de la Figura 16, se observa un desplazamiento conforme el incremento de la concentración del extracto respecto a la curva del blanco.

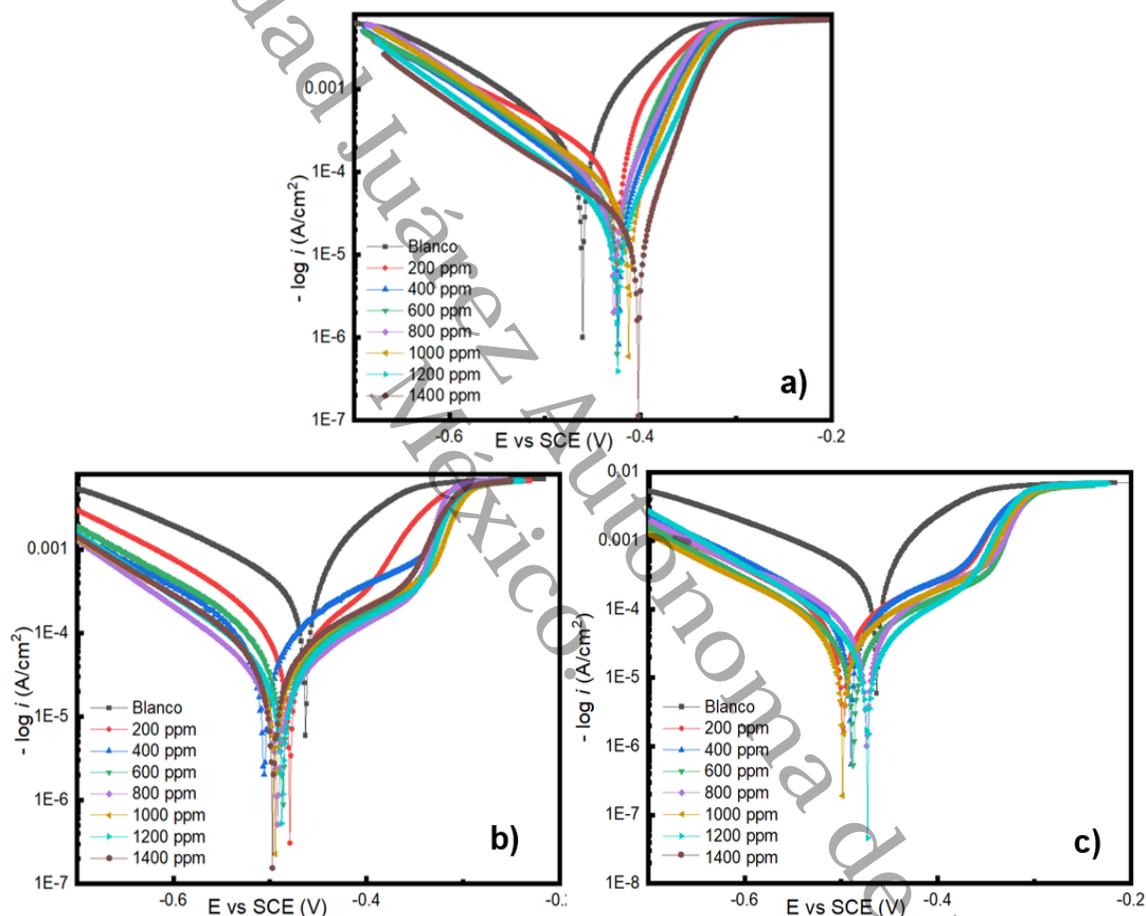
Este comportamiento puede explicar que el inhibidor forma una película en la superficie del metal y bloquea la formación de sitios activos anódicos y catódicos que son los causantes de la corrosión (Haldhar et al., 2021).

Otras investigaciones han encontrado un comportamiento similar a lo que se muestra en la Figura 16, entre ellos se puede citar la investigación realizada por Muliastri et al. (2021), que utilizó a la hoja de mango como inhibidor y encontró que el desplazamiento de

la curva de Tafel, ocurre cuando se aumenta la concentración del extracto, esto refleja una disminución en el valor de I_{corr} , de modo que la velocidad de corrosión disminuye (Muliastri et al., 2021).

Figura 16

Curvas de polarización de Tafel para el EHTS a diferentes concentraciones en tiempos de inmersión del acero al carbono SAE 1010 de a) 1 h, b) 24 h y c) 48 h



Nota: Las curvas de Tafel se presentan de 0 a 1400 ppm, siendo que para 1200 ppm es la eficiencia mas alta.

En la Tabla 8, se muestran los valores de los parámetros de corrosión, que se calcularon a partir de las curvas de polarización de Tafel; potencial de corrosión (E_{corr}), densidad de corriente (I_{corr}), la pendiente de las curvas de Tafel anódica (β_a) y catódica (β_c), y los valores de resistencia a la polarización (R_p).

Tabla 8

Parámetros de resistencia a la polarización del acero al carbón SAE 1010 en HCl del EHTS

Concentración del inhibidor	Tiempo de inmersión	$-E_{corr}$ (mV)	I_{corr} ($\mu\text{A cm}^{-2}$)	β_a mV/dec	β_c mV/dec	η (%)	ϵ
Blanco	1 h	461	19.17	0.126	0.175	0	0.00
	24h	463	32.98	0.279	0.488	0	0.00
	48 h	464	36.9	0.426	0.608	0	0.00
200 ppm	1 h	426	7.76	0.092	0.204	59	0.595
	24h	480	9.7	0.117	0.1	74	0.745
	48 h	488	9	0.121	0.076	80	0.799
400 ppm	1 h	426	5.37	0.059	0.151	72	0.719
	24h	505	8.4	0.095	0.074	83	0.831
	48 h	476	6.3	0.128	0.088	84	0.842
600 ppm	1 h	420	3.95	0.075	0.163	79	0.794
	24h	482	5.3	0.94	0.076	86	0.860
	48 h	476	5.5	0.0895	0.099	88	0.877
800 ppm	1 h	428	2.78	0.059	0.136	85	0.855
	24h	479	4.7	0.0809	0.075	86	0.861
	48 h	473	6.2	0.1	0.144	87	0.872
1000 ppm	1 h	413	2.99	0.047	0.123	86	0.861
	24h	494	4.8	0.075	0.08	88	0.882
	48 h	497	4.2	0.089	0.0832	90	0.906
1200 ppm	1 h	409	2.43	0.102	0.186	87	0.873
	24h	475	3.6	0.079	0.073	90	0.905
	48 h	472	3.1	0.099	0.114	91	0.913
1400 ppm	1 h	498	3.13	0.135	0.37	83	0.837
	24h	497	4.5	0.048	0.081	84	0.840
	48 h	486	4.9	0.069	0.085	86	0.861

Se observa una disminución en los parámetros electroquímicos de acuerdo con el incremento de EHTS, siendo que en la concentración de 1200 ppm, en tres tiempos de inmersión de 1h, 24 h y 48 h, las densidades de corriente (I_{corr}) fueron 2.43, 3.6, y 3.9 $\mu\text{A cm}^{-2}$ y para los potenciales de corrosión medidos (E_{corr}) fueron 409, 475, y 472 mV en

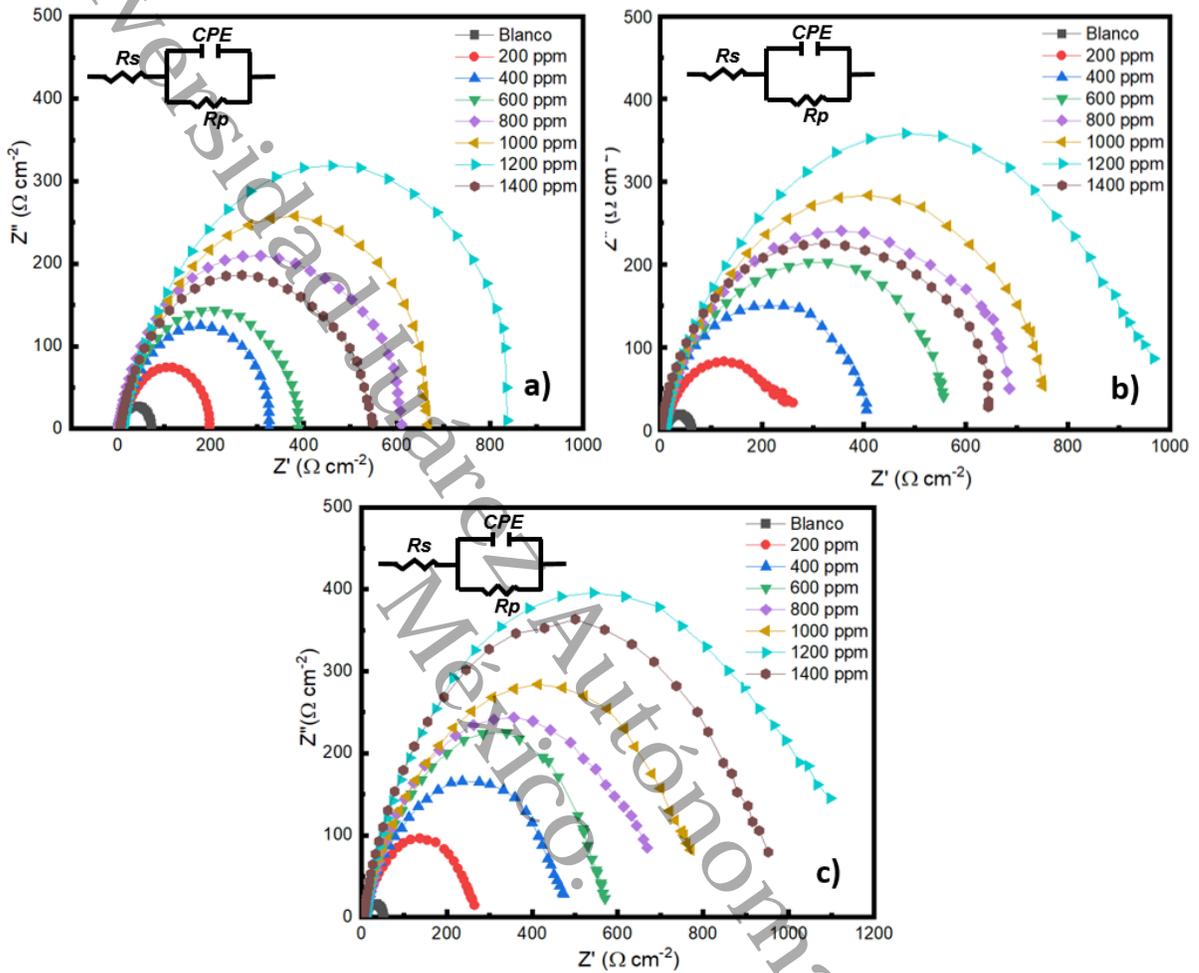
tres tiempos de inmersión de 1h, 24 h y 48 h. Estudios realizados por Manantapong et al. (2020), usando extractos de Thai-bael, concluyeron que cuando los valores de densidad de corriente (I_{corr}) muestran una disminución respecto al blanco, se atribuye a un inhibidor de tipo mixto, éste efecto se debe principalmente a la reducción de la densidad de corriente debido a que el inhibidor se adsorbe en la superficie del metal (Manantapong et al., 2020).

Estudios realizados por Haldhar et al. (2020), con extractos de *Momordica charantia*, mencionan que la disminución de I_{corr} se debe a la forma en que las moléculas inhibidoras activas se adsorben en la superficie del metal y con el aumento de la concentración del inhibidor, la densidad de corriente de corrosión disminuye constantemente (Haldhar et al., 2020b). Everton et al. (2020), mencionan que para definir si un inhibidor es de tipo mixto, éste debe tener valores de ± 80 mV de diferencia entre el potencial de corrosión (E_{corr}) del blanco y el potencial de corrosión con inhibidor (Policarpi y Spinelli, 2020).

De acuerdo con los datos obtenidos entre la diferencia del E_{corr} del blanco y el E_{corr} con EHTS la diferencia en tiempos de inmersión de 1h, 24 h y 48 h fue de 52, -12, y -8 mV, donde se observa que éste valor es inferior de ± 80 mV, por lo tanto, se considera el EHTS como inhibidor de tipo mixto es decir con influencia sobre las reacciones tanto anódicas (oxidación del átomo del hierro) como catódicas (evolución del hidrógeno). Estudios de Kaur et al. (2022), mencionan que el uso de inhibidores (extracto de fruta de *Hymenaea stigonocarpa*) es una excelente alternativa para la protección contra la corrosión (Kaur et al., 2022). Estos inhibidores pueden formar una barrera o película sobre la superficie del metal, eliminando o atenuando el proceso de corrosión que pueden modificar las reacciones anódicas-catódicas, disminuyendo la difusión de iones a la superficie metálica o aumentando la resistencia eléctrica de la superficie. Estudios de Sangeetha et al. (2019), mencionan, que si el valor de β_a se encuentra más alto que el β_c en solución de HCl de 1M sin inhibidor indica que la corrosión en medio ácido se debe a la disolución anódica del metal lo que indica que el valor de β_c se debe a la disolución catódica del metal (Sangeetha et al., 2019; Jayakumar et al., 2020b; Gapsari et al., 2021), en éste trabajo los valores son de 0.175, 0.488 y 0.608 mV/dec en los tiempos de inmersión de 1h, 24h y 48 h. En las Figura 17a, 17b y 17c se muestran los diagramas Nyquist, para el EHTS, se observo que con respecto al blanco los radios de los semicírculos aumentan, debido a la incorporación del EHTS, esto se presenta para el tiempo de inmersión de t_1 , t_2 y t_3 . Con los datos obtenidos se supuso el circuito eléctrico equivalente (CEE) dentro de los diagramas de Nyquist usando el software Zsim.

Figura 17

Diagramas de Nyquist a diferentes concentraciones del EHTS en: a) 1 h de inmersión, b) 24 h de inmersión y c) 48 h de inmersión.



Nota: El diagrama de Nyquist se presentan de 0 a 1400 ppm, siendo que para 1200 ppm es la eficiencia mas alta.

De la Figura 17 (diagrama de Nyquist) y la Tabla 9, se observo el incremento del valor en R_{ct} , y aplicando la Ecuación 32, en la concentración de 1200 ppm se presentó la mayor eficiencia del 91, 93 y 95 % en tiempos de inmersión de 1h, 24 h y 48 h y en concentración de 1200 ppm..

Tabla 9

Parámetros de EIE para el acero 1010 en 1 M de HCl del EHTS

Concentración	Rct _{t1}	η_{t1}	Rct _{t2}	η_{t2}	Rct _{t3}	η_{t3}
Blanco	73.50	0	63.64	0	53.17	0
200 ppm	191.76	62	260.92	76	264.88	80
400 ppm	323.12	77	410.22	84	473.86	89
600 ppm	388.15	81	552.62	88	570.47	91
800 ppm	596.99	88	695.14	91	668.87	92
1000 ppm	640.68	88	753.52	91	770.97	93
1200 ppm	832.97	91	967.99	93	1097.33	95
1400 ppm	548.97	87	643.76	90	952.15	94

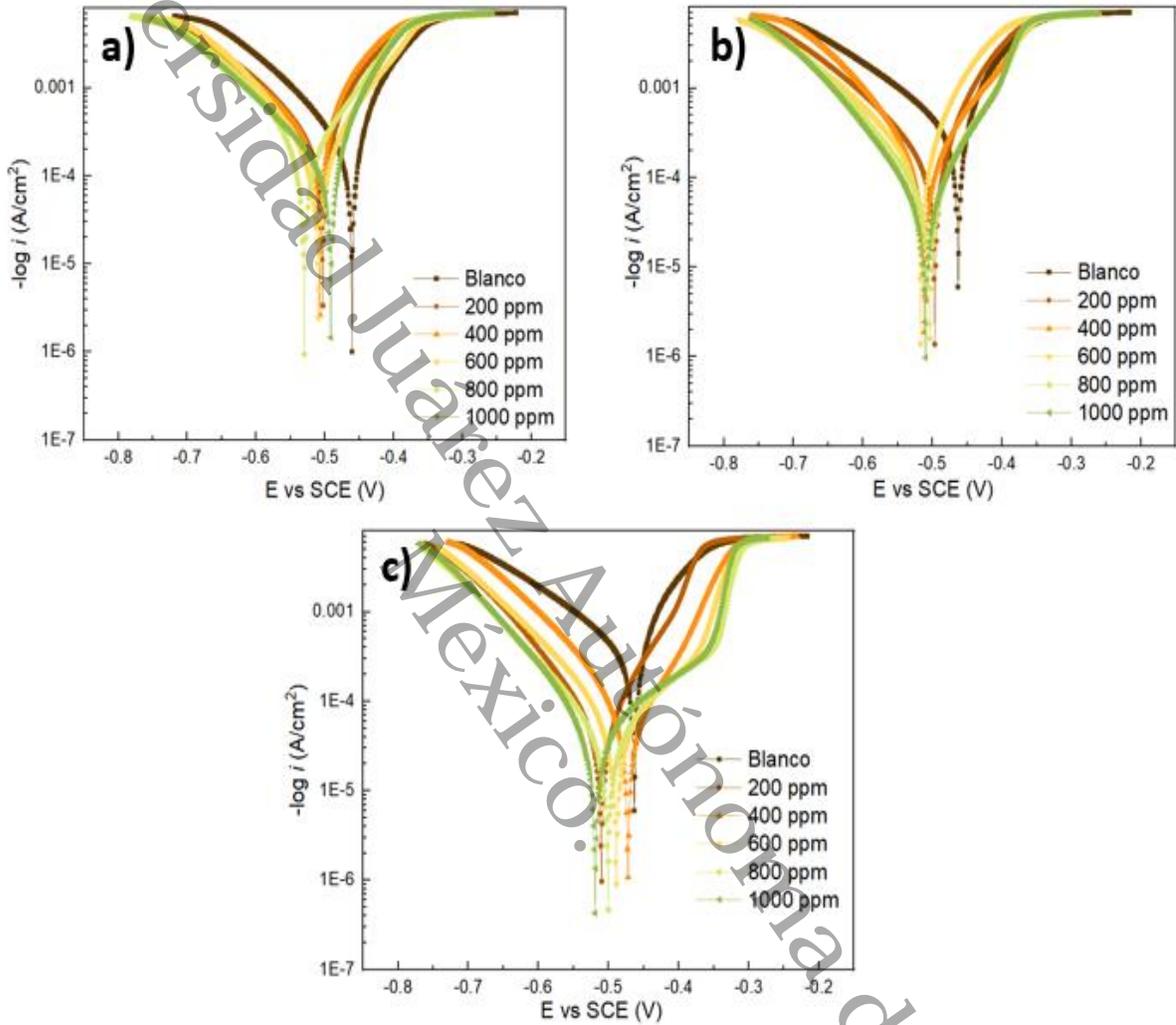
7.5 Análisis de Técnicas Electroquímicas en Medio Ácido con ECMP

Se determinaron las curvas de PPD de acero al carbono SAE 1010 en ausencia y presencia de ECMP en solución de HCl 1M a temperatura ambiente, en tiempos de inmersión de: $t_1=1$ h, $t_2=24$ h y $t_3=48$ h.

Las curvas de Tafel se muestran en la Figura 18 para el acero al carbón SAE 1010 en presencia de ECMP, se observa un cambio a medida que aumenta la concentración de ECMP en comparación con la curva en blanco. Los potenciales de corrosión son menos positivos que el blanco. Las ramas catódica y anódica se encuentran por debajo de la curva de referencia de la solución en blanco. El inhibidor forma una película sobre la superficie del metal y bloquea la formación de sitios activos tanto anódicos como catódicos, el cambio en la curva de Tafel aumenta con la concentración del extracto, en donde refleja una disminución en el valor de I_{corr} , es decir, la velocidad de corrosión disminuye (Haldhar et al., 2020; Manantapong et al., 2020; Policarpi y Spinelli, 2020).

Figura 18

Curvas de polarización de Tafel para acero a diferentes concentraciones de ECMP y tiempos de inmersión: a) 1 h, b) 24 h y c) 48 h



Nota: Las curvas de Tafel se presentan de 0 a 1000 ppm, siendo que para 1000 ppm es la eficiencia mas alta.

La Tabla 10 muestra los parámetros electroquímicos, que se calcularon a partir de las curvas de polarización de Tafel; potencial de corrosión (E_{corr}), densidad de corriente (i_{corr}), pendiente de Tafel anódica (β_a) y catódica (β_c), eficiencia de inhibición (η) y área de cobertura (θ) a varias concentraciones del ECMP. En el caso de los tres tiempos de inmersión, respecto a la solución sin inhibidor, la adición de ECMP en solución de HCl reduce la intensidad de la corriente de corrosión.

Tabla 10

Cambios en E_{corr} , I_{corr} , β_a , β_c , eficiencia (η) y cobertura (θ) de acero en medio ácido con y sin adición de ECMP

Concentración de inhibidor	tiempos de inmersión	$-E_{corr}$ (V)	I_{corr} ($\mu\text{A cm}^{-2}$)	β_a mV/dec	β_c mV/dec	η (%)	θ
Blanco	1 hora	461	19.17	0.126	0.175	0	0
	24h	463	32.98	0.279	0.488	0	0
	48 horas	464	36,9	0.426	0.608	0	0
200 ppm	1 hora	503	10.63	0.72	1.1	45	0.45
	24h	496	14.76	0.515	2.218	55	0.55
	48 horas	508	16.11	0.551	1.92	56	0.56
400 ppm	1 hora	511	9.63	0.715	1.11	50	0.50
	24h	512	10.48	0.798	1.943	68	0.68
	48 horas	472	11.48	1.088	1.19	70	0.70
600ppm	1 hora	510	7.76	0.663	1.16	59	0.59
	24h	516	8.80	0.934	1.984	73	0.73
	48 horas	488	9.25	0.832	1.36	75	0.75
800ppm	1 hora	538	5.33	0.714	1.24	72	0.72
	24h	503	6.41	0.797	1.225	80	0.80
	48 horas	500	6.84	0.879	0.822	81	0.81
1000ppm	1 hora	491	4.51	0.874	1.43	76	0.76
	24h	509	3.56	0.924	1.093	89	0.89
	48 horas	519	3.22	0.973	0.745	91	0.91

A una concentración de 1000 ppm, la densidad de corriente de corrosión (I_{corr}) es 4.51, 3.56 y 3.22 A cm^{-2} en tiempos de inmersión de 1 h, 24 h, y 48 h. El potencial de corrosión respectivo (E_{corr}) es -491, -509 y -519 mV en tiempos de inmersión de 1 h, 24 h, y 48 h. Las pendientes anódicas (β_a) y catódica (β_c) no cambian significativamente, lo que sugiere que no hay cambios en el mecanismo de corrosión (Unnimaya et al., 2022a). Por otro lado, la eficiencia aumenta con el tiempo de inmersión con ECMP de 76 %, 89 % y 91 % en tiempos de inmersión de 1 h, 24 h, y 48 h. Estos inhibidores forman una barrera o película sobre la superficie metálica, atenuando el proceso de corrosión y modificando la velocidad de las reacciones anódico-catódicas, disminuyendo la llegada o salida de especies de la superficie metálica o aumentando la resistencia eléctrica en la superficie metálica (Jayakumar et al., 2020; Kaur et al., 2022a).

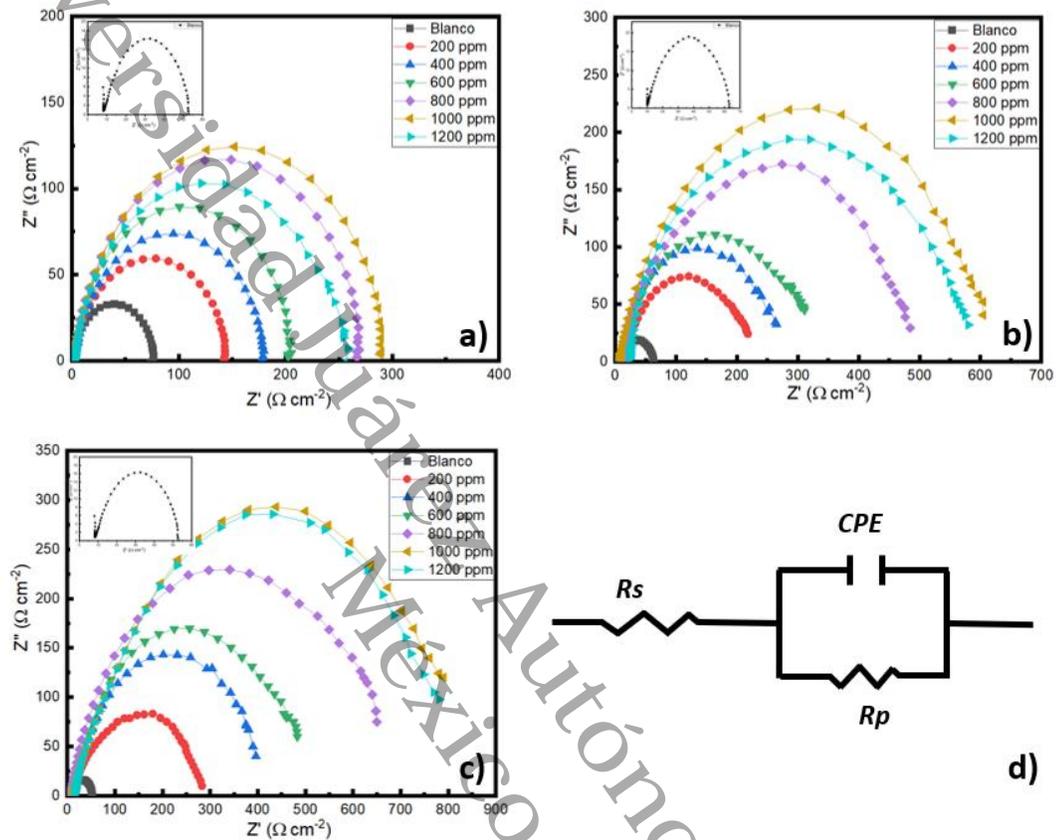
En presencia de ECMP, el potencial de corrosión (E_{corr}) se desplaza hacia la región anódica. La curva anódica es responsable de la oxidación del metal, mientras que la curva catódica es responsable del desprendimiento del hidrógeno en el medio ácido, sin embargo, para determinar el tipo de inhibidor, el desplazamiento debe ser inferior a ± 85 mV. Según los resultados de E_{corr} , el ECMP es un inhibidor de tipo mixto con un valor de ± 42 , ± 42 y ± 49 en tiempos de inmersión de 1 h, 24 h, y 48 h, lo que reduce el fenómeno de la corrosión. Esto puede deberse a la adsorción de moléculas del ECMP en la superficie del acero dulce. La reducción significativa en la densidad de corriente de corrosión (i_{corr}) indica una disminución en la corrosión y un aumento en la eficiencia del inhibidor del ECMP.

En las Figuras 19a, 19b y 19c se muestran los diagramas Nyquist, para el ECMP se observó que con respecto al blanco los radios de los semicírculos aumentan, debido a la incorporación del extracto, esto se presenta para el tiempo de inmersión de 1 h, 24 h, y 48 h. Con los datos obtenidos se supuso el circuito equivalente de la Figura 19 d, usando el software Zsim. Los diagramas de Nyquist para el acero en presencia de diferentes concentraciones del ECMP se presentan para los tres tiempos de inmersión de: 1 h (Figura 19a), 24 h (Figura 19b) y 48 h (Figura 19c). Se observa que, con respecto al blanco, los radios de los semicírculos aumentan, debido al incremento de la concentración del extracto.

Los datos obtenidos se ajustaron al circuito equivalente propuesto para cada tiempo de inmersión, utilizando el software Zsim

Figura 19

Diagramas de Nyquist a diferentes concentraciones del ECMP en: a) 1 h de inmersión, b) 24 h de inmersión, c) 48 h de inmersión y d) circuito eléctrico equivalente



Nota: Los diagramas de Nyquist se presentan de 0 a 1200 ppm, siendo que para 1000 ppm es la eficiencia mas alta.

En la Tabla 11 se observó que en 1000 ppm alcanzó la máxima eficiencia de 75, 89 y 93 en tres tiempos de inmersión de 1 h, 24 h y 48 h. Estudios de Saxena et al. (2021), mostraron aumento en los semicírculos en los diagramas de Nyquist, debido al aumento de las concentraciones del extracto de *Tinospora cordifolia*, mencionan que el aumento en los R_{ct} se debe a la adsorción en la superficie del acero, logrando eficiencia de 87.18% en 500 ppm (Saxena et al., 2021). Estudios de Cherrad et al. (2020), mostraron bucles (forma helicoidal) de forma similar, esta observación indica que la corrosión del acero en solución ácida es controlada por el proceso de transferencia de carga en la interfaz electrodo-

solución, alcanzando un valor máximo de 95% a 500 ppm con extracto de ciprés de Arizona (Cherrad et al., 2020).

Tabla 11

Parámetros para el acero 1010 en 1 M de HCl del ECMP

Concentración	Rct _{t1}	η_{t1}	Rct _{t2}	η_{t2}	Rct _{t3}	η_{t3}
Blanco	73.691	0	63.646	0	53.172	0
200 ppm	140.347	47	208.255	69	268.657	80
400 ppm	176.674	58	255.128	75	382.939	86
600 ppm	200.84	63	301.51	79	468.869	89
800 ppm	266.643	72	438.46	85	637.171	92
1000 ppm	289.617	75	600.407	89	766.67	93
1200 ppm	258.491	71	570.203	89	745.807	92

De acuerdo con Dhouibi et al. (2021), el aumento en diámetro de los bucles en el diagrama de Nyquist, indica una mejora de película de superficie más capacitiva, favoreciendo la formación de capa protectora, mostrando mayor eficiencia del 91.8% en 1000 ppm del extracto de romero y mayor eficiencia del 92.54% en 1000 ppm del extracto de mirto (Dhouibi et al., 2021). Según Zakeri et al. (2022), los bucles son los resultados de dispersión producida por rugosidad en la superficie del metal y presencia de capas porosas permitiendo la adsorción de las moléculas inhibidoras (Zakeri et al., 2022).

7.6 Pérdida de Peso en Medio Ácido del EHTS y el ECMP

El análisis de pérdida de peso se efectuó a 298 K, en ausencia y presencia del extracto a diferentes concentraciones durante 6 días. Los datos de eficiencia y velocidad de corrosión se muestran en la Tabla 12 para el EHTS y la Tabla 13 para el ECMP. Se puede ver que la eficiencia de inhibición aumenta de acuerdo con el incremento de la concentración de extracto de EHTS, alcanzando 94% de eficiencia en concentraciones de 1200 ppm. Mientras que para el ECMP alcanzó como máxima eficiencia en 1000 ppm con 91%.

Tabla 12

Parámetros de corrosión de pérdida de peso del acero al carbon SAE 1010 a diferentes concentraciones del EHTS en 6 días de inmersión

Concentración (ppm)	Vcorr (mg/cm ² h)	η (%)
0	30.106	0
200	17.674	52
400	12.374	69
600	6.123	80
800	4.573	85
1000	2.721	91
1200	1.360	94
1400	3.153	87

Tabla 13

Parámetros de corrosión de pérdida de peso del acero al carbon SAE 1010 a diferentes concentraciones del ECMP en 6 días de inmersión

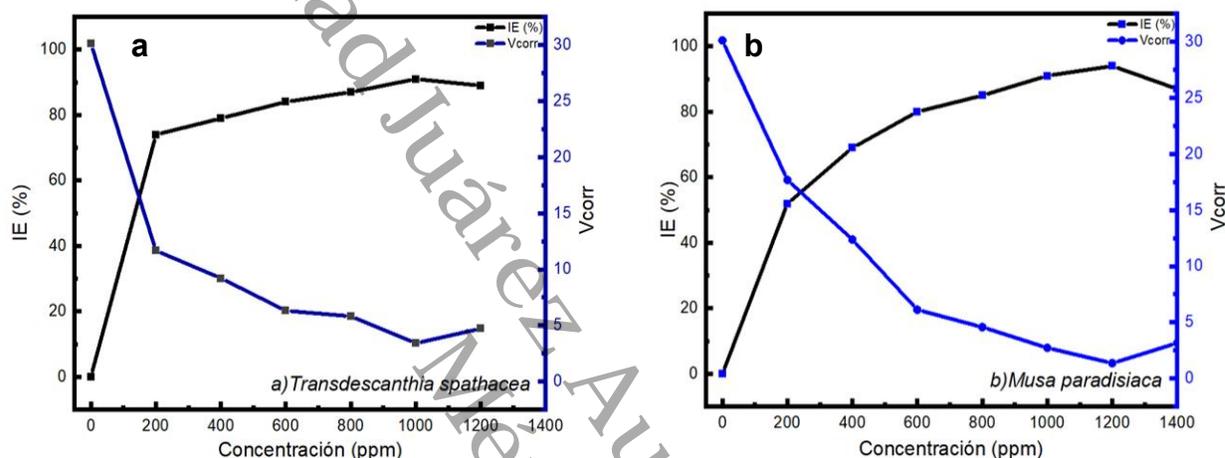
Concentración (ppm)	Vcorr (mg/cm ² h)	η (%)
0	30.106	0
200	11.675	74
400	9.209	79
600	6.319	84
800	5.816	87
1000	3.415	91
1200	4.711	89

En la Figura 20a y 20b se observa que de acuerdo con el incremento de concentración del extracto, los valores de velocidad de corrosión (Vcorr) disminuyen, lo que implica que inhibe la corrosión en el acero SAE 1010 en una solución de HCl 1M, alcanzando la menor velocidad de corrosión de 1.36 mg/cm² h en concentración de 1200

ppm para el EHTS mientras los valores de eficiencia aumentan alcanzando su mayor porcentaje de eficiencia del 94% y para el ECMP alcanzó la menor velocidad de corrosión de 3.415 mg/cm² en concentración de 1000 ppm con eficiencia máxima de 91%.

Figura 20

Velocidad de corrosión al carbon SAE 1010 y porcentaje de eficiencia a) del EHTS y b) del ECMP



Nota: Los puntos negros y azules indican la concentración de los extractos.

Estudios previos de Haris et al. (2019), realizados con palma aceitera, concluyen que el aumento de inhibición se debe a las propiedades inhibitorias y que son adsorbidas en la superficie del metal, evitando el fenómeno de corrosión en los sitios activos del acero, el mejor porcentaje de inhibición se da cuando la cobertura de la superficie del metal es mayor (Haris et al., 2019). Comparando los resultados con otros trabajos que se realizaron con *Musa paradisiaca* que se muestran en la Tabla 14, se puede observar que la eficiencia en éste trabajo es ligeramente mayor, superando la eficiencia del 91%. Esto indica que los compuestos con capacidad inhibitoria están presentes en todos los extractos a pesar de utilizar diferentes procedimientos, parte de la planta y solventes. Existen diferentes tipos de extractos de *Musa paradisiaca*: acuosos, etanólico, acetónico, de cáscara y hoja. En la Tabla 14 se muestra las eficiencias de acuerdo con el espécimen y medio, se observó que no son grandes a pesar de que los extractos y los ambientes son diferentes. Considerando que solamente se requiere una concentración mínima de los compuestos inhibitorios para

ser efectivos, su presencia en todos los extractos permite determinar un marcado carácter inhibitor de todos ellos para todos los ambientes ensayados.

Tabla 14

Resultados reportados en la literatura sobre inhibidor de corrosión de Musa paradisiaca y de éste trabajo

Espécimen	Solucion de extracción	Medio	Concentración del extracto	Eficiencia	Referencia
Cáscara de <i>Musa paradisiaca</i>	Acetona	HCl 1M	300 mgL ⁻¹ (300 ppm)	89-90%	(Ji et al., 2015a)
Hoja de <i>Musa paradisiaca</i>	Agua	H ₂ SO ₄ 0.5M	3g/L (3000 ppm)	81.9%	(Mayanglambam et al., 2011)
Hoja de <i>Musa paradisiaca</i>	Agua	Medio marino (agua recolectada)	1000 ppm	86.51%	(Rosliza y Nurashimah, 2021)
Cáscara de <i>Musa paradisiaca</i>	Agua	HCl 0.1 M	500 ppm	87%	(Cheirmakani et al., 2019)
Cáscara de <i>Musa paradisiaca</i>	Etanol	HCl 1 M	1000 ppm	91-93%*	Éste trabajo

Nota: *Rango de eficiencia para el mayor tiempo en las tres técnicas utilizadas PP, EIE y PPD

La Tabla 15 muestra los valores de cobertura de área superficial (θ) y los valores de capacitancia de doble capa (Cdl), para los tres tiempos de inmersión en diferentes concentraciones de extracto de ECMP.

El grado de cobertura (Ecuación 38) aumenta con el tiempo de inmersión, alcanzando valores máximos de 0.75, 0.89 y 0.93 para los tiempos de inmersión de 1h, 24 h y 48 h. El aumento de Rct se atribuye al aumento de la cobertura superficial de las moléculas del ECMP en la superficie del electrodo. La capacitancia de doble capa disminuye con el tiempo de 4.42, 1.20 y 0.71 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ para los tiempos de inmersión de 1h, 24 h y 48 h.

$$REA = 1 - \theta \quad (38)$$

Donde $\theta = \eta / 100$; θ = grado de cobertura.

Tabla 15

Cobertura superficial y capacidad de doble capa determinadas a diferentes concentraciones de extractos de ECMP y tres diferentes tiempos de inmersión

Concentración (ppm)	θ_{t_1}	C_{dl, t_1} ($\mu F / cm^2$)	θ_{t_2}	C_{dl, t_2} ($\mu F / cm^2$)	θ_{t_3}	C_{dl, t_3} ($\mu F / cm^2$)
0	0	65.77	0	134.44	0	196.40
200	0.48	19.11	0.69	10.27	0.80	7.12
400	0.58	12.22	0.75	6.313	0.86	2.90
600	0.63	8.877	0.79	4.778	0.89	2.00
800	0.72	5.11	0.85	2.11	0.92	1.09
1000	0.76	4.42	0.89	1.20	0.91	0.71

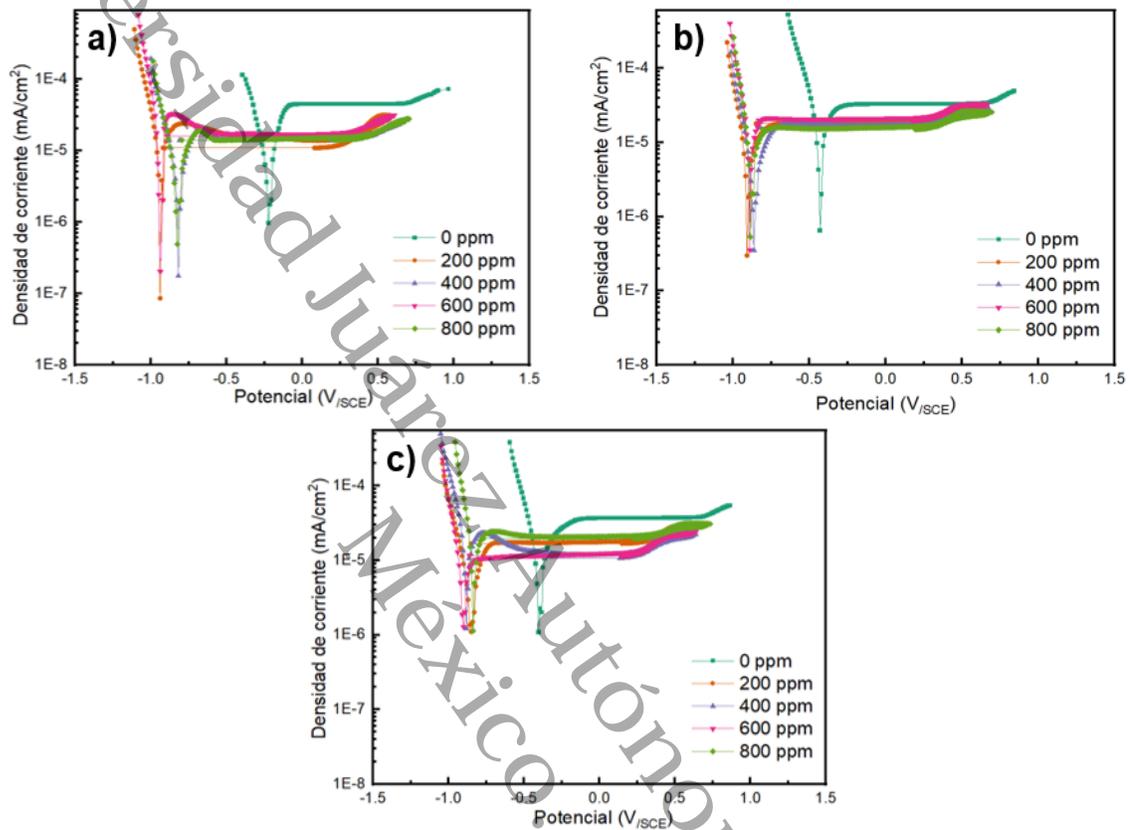
7.7 Técnicas electroquímicas con el EHTS en medio alcalino

Se realizó la técnica de PPD a concentraciones de 0-800 ppm del EHTS con una solución de NaCl al 3.5% añadiendo KOH para estabilizar el pH a 12.5, donde la velocidad de la corrosión está controlada fundamentalmente por la difusión del oxígeno disuelto en la solución, efecto que ocurre en medios neutros y alcalinos.

En la Figura 21, se observan las curvas de Tafel en tiempos de inmersión de a) 1 h, b) 24 h y c) 48 h, se puede mencionar que en las curvas catódicas se encuentra la región más negativa que se relaciona con el corriente límite de difusión, mientras que en la región anódica se observan los puntos de inflexión para cada concentración del ECMP, que tiende a ser lineal y paralela al eje de potencial hasta el potencial de picadura (E_{pic}).

Figura 21

Curvas de polarización potenciodinámica del EHTS en medio alcalino en tiempos de inmersión de: a) 1 h, b) 24 h y c) 48 h



Nota: Las curvas de polarización se muestran hasta 800 ppm debido a la disminución de eficiencia.

En la Tabla 16 se muestran los datos que se representan en la Fig. 21, se puede observar que entre los parámetros electroquímicos de las curvas de polarización de Tafel se encuentran los potenciales de corrosión (E_{corr}), densidad de corriente (I_{corr}), potencial de picadura (E_{pic}), pendiente de las curvas de Tafel anódica (β_a), pendiente de Tafel catódica (β_c), y porcentaje de eficiencia (η). Se observa un desplazamiento conforme el incremento de la concentración del EHTS en comparación a la curva sin el EHTS. Después del tiempo de inmersión se observa que los potenciales de corrosión son más negativos que el blanco en un valor superior a 500 mV. Indudablemente éste cambio significativo en el potencial de corrosión, cuando se añade el EHTS, es un índice de la acción de éste extracto en la superficie del acero.

Tabla 16

Parámetros electroquímicos obtenidos con la técnica de polarización potenciodinámica en una solución alcalina de NaCl al 3.5% y con diferentes concentraciones del EHTS

Concentración del inhibidor	Tiempo de inmersión	$-E_{corr}$ (V)	Epit (mV/SCE)	I_{corr} ($\mu\text{A cm}^{-2}$)	β_c mV/dec	β_a mV/dec	η (%)
Blanco	1 h	-0.23	0.67	9.57E-07	-10.3	0.94	0
	24h	-0.43	0.66	6.47E-07	-8.71	1.61	0
	48 h	-0.45	0.36	1.91E-06	-9.34	1.52	0
200 ppm	1 h	-0.93	0.36	8.52E-08	-8.04	0.21	91
	24h	-0.91	0.35	2.98E-07	-11.18	0.19	54
	48 h	-0.35	0.37	1.10E-06	-7.55	0.19	42
400 ppm	1 h	-0.93	0.42	2.00E-07	-7.99	0.19	79
	24h	-0.86	0.38	3.35E-07	-10.22	0.17	48
	48 h	-0.88	0.29	1.22E-06	-12.67	0.34	36
600 ppm	1 h	-0.81	0.33	1.74E-07	-5.76	0.007	82
	24h	-0.89	0.31	3.59E-07	-12.08	0.14	45
	48 h	0.9	0.27	1.27E-06	-11.32	0.23	34
800 ppm	1 h	-0.82	0.46	4.88E-07	-9.26	0.21	49
	24h	-0.88	0.37	3.98E-07	-13.73	0.16	38
	48 h	-0.83	0.41	1.32E-06	-10.14	0.14	31

La rama anódica sin adición de EHTS se encuentra siempre por encima de dicha rama en presencia del extracto, lo que indica un aumento del cubrimiento de los sitios

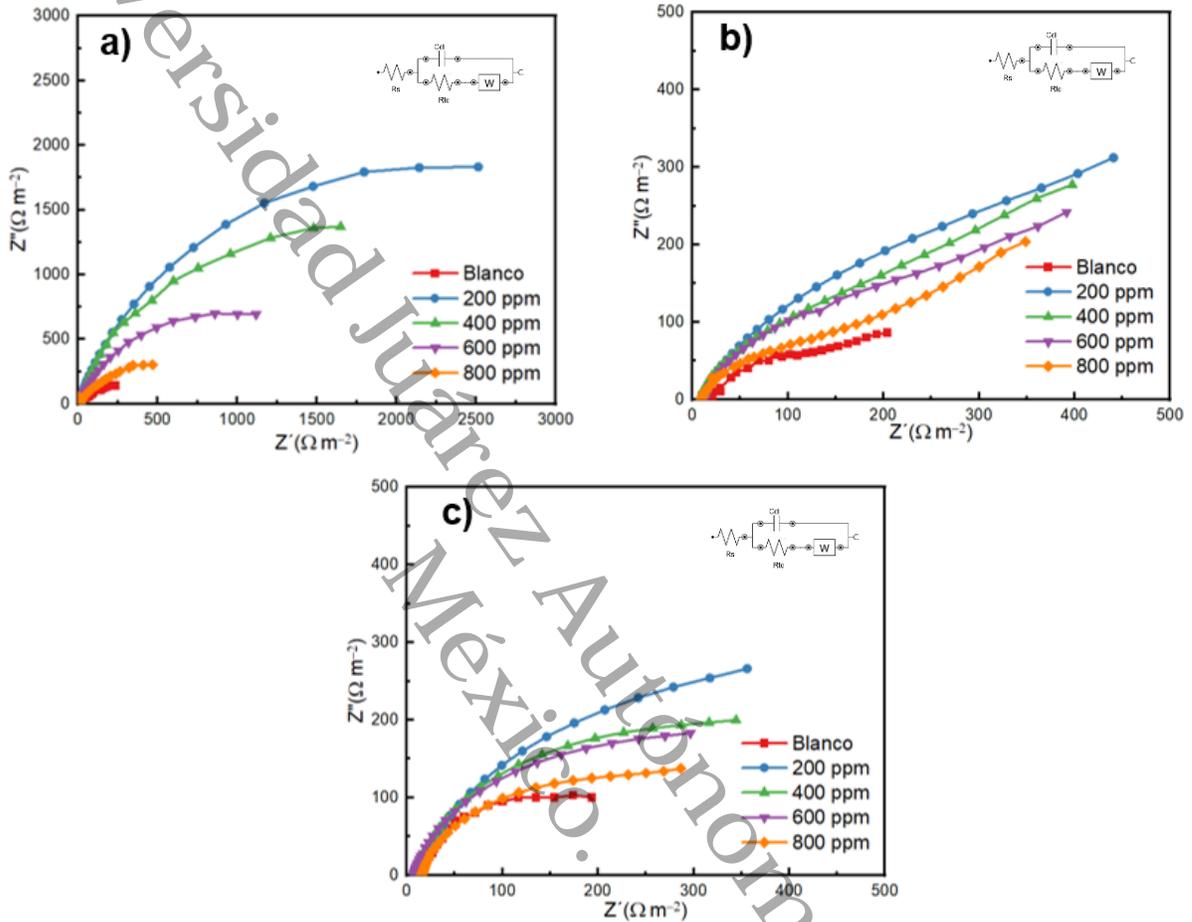
anódicos activos. El inhibidor debe formar una película en la superficie del metal aumentando la resistencia de los sitios activos anódicos. Pudiera adsorberse en los sitios activos libres de la capa pasiva o sobre toda la superficie, incluyendo la capa pasiva y los sitios libres. La forma de la curva catódica no cambia en presencia de EHTS, aunque si hay un cambio significativo en el potencial lo que puede implicar una mayor dificultad para la reducción del oxígeno producto de la adsorción del inhibidor en la superficie. En la presencia de EHTS, el potencial de corrosión (E_{corr}) se desplaza hacia la región anódica.

La curva anódica es responsable de la oxidación del metal, mientras que la curva catódica es responsable de la evolución de oxígeno. Los datos presentados en la Tabla 16 demuestran que β_a es mayor que β_c en las concentraciones del EHTS que pueda indicar que la polarización anódica se ve afectada en mayor medida (Unnimaya et al., 2022b). La densidad de corriente de corrosión (I_{corr}) en el OCP disminuye y por tanto se observa la efectividad del EHTS. Por otro lado, se observó que la eficiencia (η) disminuye con el incremento del tiempo de inmersión y la concentración, solo obtiene la máxima eficiencia en concentración de 200 ppm del EHTS, en tiempos de inmersión de 1 h. El potencial de picadura se hace menos positivo con la presencia y aumento de concentración del producto, por lo que no resulta efectivo proteger contra este tipo de corrosión.

En la Figura 22 se muestran diagramas de Nyquist para las concentraciones de 0-800 ppm en una solución de NaCl al 3.5%, en tres tiempos de inmersión de 1 h (Figura 22a), 24 h (Figura 22b) y 48 h (Figura 22c).

Figura 22

Diagramas de Nyquist del EHTS en medio alcalino en tiempos de inmersión de: (a) 1 h, (b) 24 h y (c) 48 h



Nota: El CEE se presenta dentro de las imágenes de cada diagrama de Nyquist.

En la Tabla 17 se muestran los cálculos de eficiencias para las concentraciones del EHTS obtenidos en la Figura 22. Se puede mencionar que de acuerdo con el aumento de concentración la eficiencia disminuyó siendo que para 200 ppm alcanzó la máxima eficiencia del 91% para el tiempo de inmersión de 1 h, donde indican una mayor resistencia a la corrosión de la película. Con los mismos datos obtenidos por la técnica de EIE en el software Nova 2.1 fue simulado el circuito eléctrico equivalente dando como resultado el diagrama que se muestra dentro de la Figura 22, parte superior.

Tabla 17

Parámetros de EIE para el acero 1010 en solución del 3.5% de NaCl con EHTS

Concentración	Rct (t ₁)	η (%)	Rct (t ₂)	η (%)	Rct (t ₃)	η (%)
0 ppm	238	0	204	0	197	0
200 ppm	2512	91	440	53	350	43
400 ppm	1650	82	397	48	320	38
600 ppm	1119	79	361	43	300	34
800 ppm	468	49	330	38	280	31

En éste esquema del circuito eléctrico equivalente (CEE) se incluye la resistencia óhmica de la solución (R_s) en la interfaz electrodo de trabajo del metal/electrodo de referencia; mientras que resistencia de transferencia de carga o resistencia de polarización (Rct) puede dominar la velocidad de los procesos electroquímicos entre el electrodo y el electrolito o a través de la doble capa eléctrica (Cdl) (Othman et al., 2019; Tian et al., 2014).

7.8 Pérdida de Peso de EHTS en Medio Alcalino

El análisis de pérdida de peso se efectuó a 298° K, en ausencia y presencia del EHTS a diferentes concentraciones durante 6 días. Los datos de eficiencia y velocidad de corrosión se muestran en la Tabla 18. Se puede observar que la eficiencia de inhibición solo aumenta en la concentración de 200 ppm, mientras que, al ir aumentando la concentración, la eficiencia disminuye hasta 17%.

Tabla 18

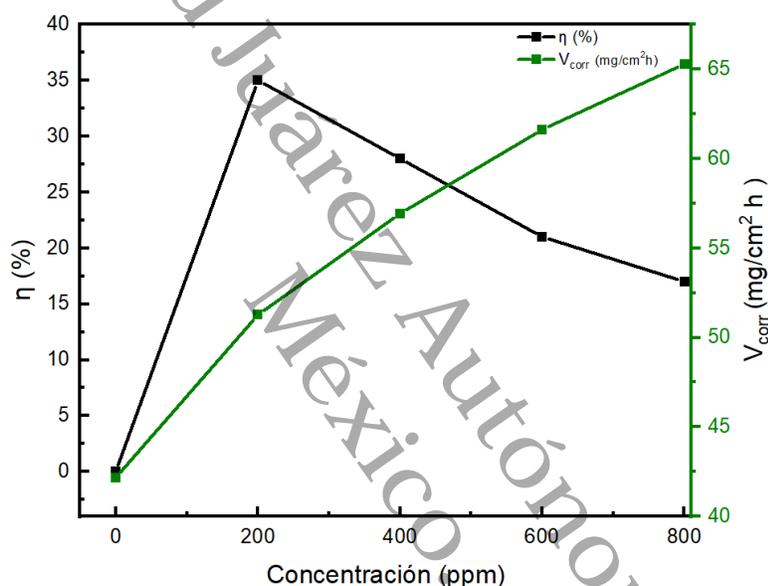
Parámetros de corrosión de PP a diferentes concentraciones del EHTS en medio alcalino

Concentración (ppm)	V _{corr} (mg/cm ² h)	η (%)
0	65.289	0
200	42.173	35
400	51.273	28
600	56.928	21
800	61.625	17

En la Figura 23 se observa que, de acuerdo con el incremento de concentración del extracto, los valores de velocidad de corrosión (V_{corr}) aumenta mientras que la eficiencia se ve disminuida al 17 % en concentración de 800 ppm, lo que implica que el EHTS inhibe ligeramente la corrosión en el acero SAE 1010 en concentración de 200 ppm en una solución de NaCl al 3.5%, alcanzando la menor velocidad de corrosión de 42.173 mg/cm²h en tiempos de inmersión de 6 días.

Figura 23

Velocidad de corrosión (V_{corr}) del EHTS en medio alcalino



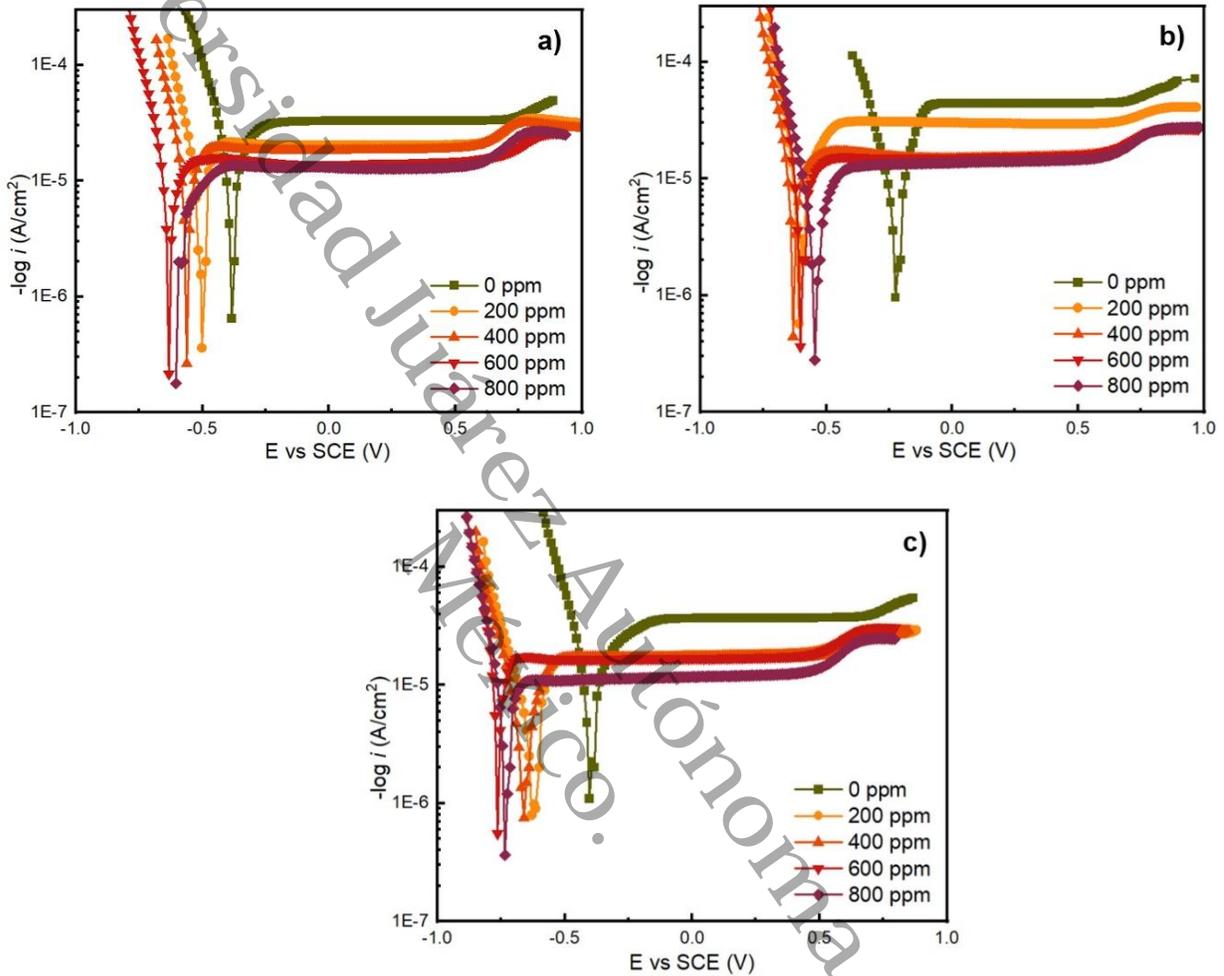
Nota: En el gráfico se muestra la velocidad de corrosión y la eficiencia por cada incremento en la concentración.

7.9 Técnicas Electroquímicas con el ECMP en Medio Alcalino

Se realizó la técnica de polarización potenciodinámica a concentraciones de 0-800 ppm del ECMP con una solución de NaCl al 3.5% añadiendo KOH para estabilizar el pH a 12.5, donde la velocidad de la corrosión está controlada fundamentalmente por la difusión del oxígeno disuelto en la solución.

Figura 24

Curvas de polarización potenciodinámica del ECMP en medio alcalino en tiempos de inmersión de: a) 1 h, b) 24 h y c) 48 h



Nota: Las curvas de polarización se muestran hasta 800 ppm debido a la disminución de eficiencia.

En la Figura 24, se observan las curvas de Tafel en tiempos de inmersión de a) 1 h, b) 24 h y c) 48 h, se puede mencionar que en las curvas catódicas se encuentra en la región más negativa que se relaciona con el corriente límite de difusión, mientras que en la región anódica se observa los puntos de inflexión para cada concentración del ECMP, que tiende a ser lineal hasta el potencial de picadura (E_{pic}).

En la Tabla 19, se puede observar los parámetros electroquímicos de la PPD que se calcularon los datos de la Figura 24.

Tabla 19

Parámetros electroquímicos obtenidos con la a técnica de PPD en una solución alcalina de NaCl al 3.5% y con diferentes concentraciones del ECMP

Concentración del inhibidor	Tiempo de inmersión	$-E_{corr}$ (V)	Epit (mV/SCE)	I _{corr} ($\mu\text{A cm}^{-2}$)	β_c mV/dec	β_a mV/dec	η (%)
Blanco	1 h	-0.23	0.67	9.57E-07	-10.3	0.94	0
	24h	-0.43	0.66	6.47E-07	-8.71	1.61	0
	48 h	-0.45	0.36	1.91E-06	-9.34	1.52	0
200 ppm	1 h	-0.64	0.66	5.72E-07	-12.38	0.01	40
	24h	-0.55	0.68	3.61E-07	-9.81	0.21	44
	48 h	-0.61	0.52	9.04E-07	-7.62	0.69	53
400 ppm	1 h	-0.63	0.60	4.43E-07	-11.45	-0.138	54
	24h	-0.56	0.61	2.63E-07	-10.41	-0.026	59
	48 h	-0.65	0.53	7.50E-07	-7.90	0.89	61
600 ppm	1 h	-0.68	0.61	3.63E-07	-13.09	-0.010	62
	24h	-0.63	0.62	2.15E-07	-10.16	-0.16	67
	48 h	-0.76	0.47	5.54E-07	-3.42	0.176	71
800 ppm	1 h	-0.54	0.61	2.80E-07	-9.97	0.21	71
	24h	-0.61	0.64	1.78E-07	-10.18	0.21	72
	48 h	-0.73	0.46	6.32E-07	-11.08	0.63	81

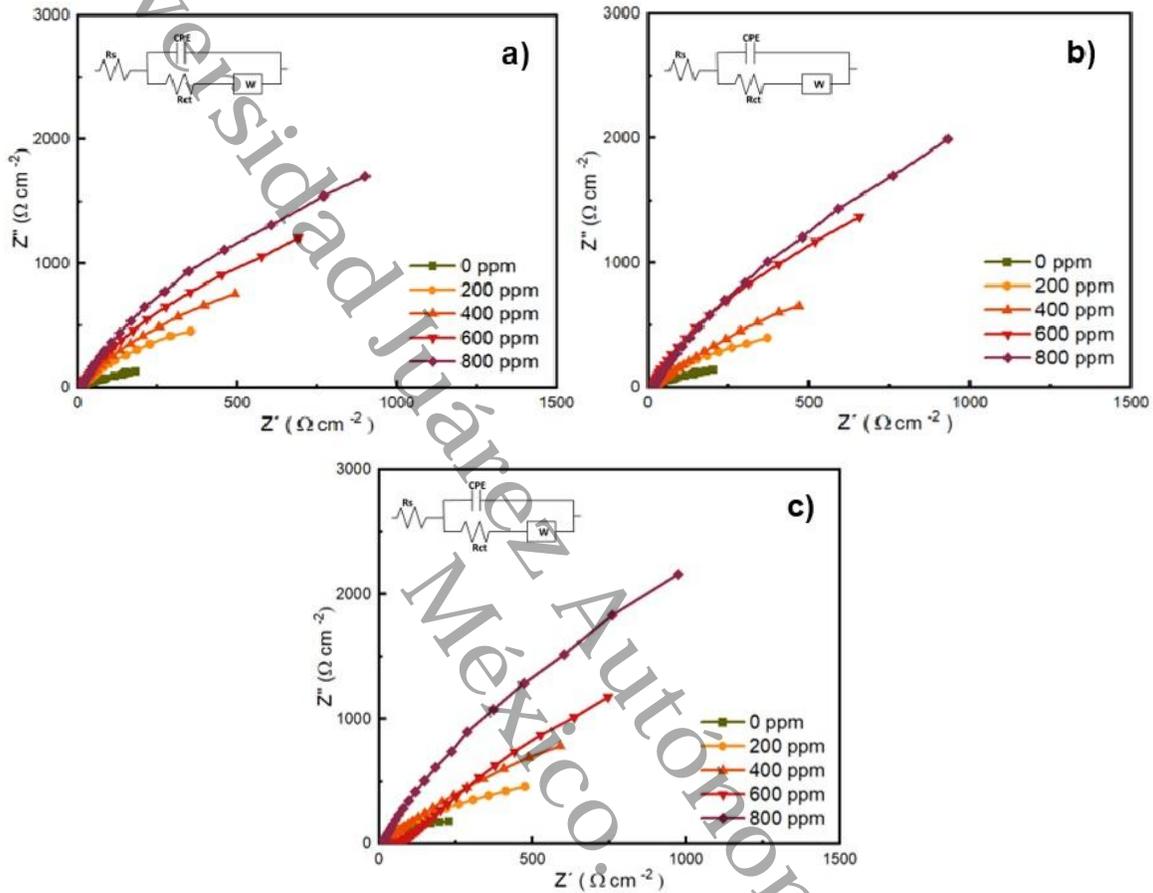
Se observa un desplazamiento conforme el incremento de la concentración del ECMP en comparación a la curva sin el ECMP. Después del tiempo de inmersión se observa que los potenciales de corrosión algo más negativos que el blanco. Esta tendencia

confirma que las ramas catódicas como las ramas anódicas se encuentran bajo la curva de referencia de la solución en blanco, hasta obtener la eficiencia máxima del 81% en concentración de 800 ppm y en tiempos de inmersión de 48 h. El inhibidor forma una película en la superficie del metal y bloquean la formación de sitios activos anódicos y sitios activos catódicos (Verma et al., 2018), en éste medio puede o debe existir una capa pasiva en la superficie, por lo que el inhibidor pudiera adsorberse en los sitios activos libres de la capa pasiva o sobre toda la superficie, incluyendo la capa pasiva y los sitios libres, el desplazamiento de la curva de Tafel, ocurre cuando se aumenta la concentración del extracto, esto refleja una disminución en el valor de I_{corr} , éste efecto se atribuye a la modificación de la reacción-proceso debido a que la superficie del electrodo está recubierta por una película protectora (Unnimaya et al., 2022c). No se observa una variación apreciable del potencial de picadura entre las mediciones sin ECMP y con ECMP, lo que indica que no es efectivo para proteger contra éste tipo de corrosión.

En la Figura 25 se muestran diagramas de Nyquist para las concentraciones de 0-800 ppm en una solución de NaCl al 3.5%, en tres tiempos de inmersión de 1 h (Figura 25a), 24 h (Figura 25b) y 48 h (Figura 25c).

Figura 25

Diagramas de Nyquist del ECMP en medio alcalino en tiempos de inmersión de: a) 1 h, b) 24 h y c) 48 h



Nota: El CEE se presenta dentro de las imágenes de cada diagrama de Nyquist.

En la Tabla 20 se muestran los cálculos de eficiencias para las concentraciones del ECMP en el OCP con valores obtenidos de la Figura 25. Se puede mencionar que de acuerdo con el aumento de concentración la eficiencia aumento, siendo que para 800 ppm alcanzó la máxima eficiencia del 79.8% en el tiempo de inmersión de 48 h, donde indican una mayor resistencia a la corrosión de la película (Yiam et al., 2022).

Tabla 20

Parámetros de EIE para el acero 1010 en solución del 3.5% de NaCl con EHTS

Concentración	Rct (t ₁)	η (%)	Rct (t ₂)	η (%)	Rct (t ₃)	η (%)
0 ppm	238	0	204	0	197	0
200 ppm	423	44	380	46	445	56
400 ppm	491	51	487	58	583	66
600 ppm	670	63	655	69	744	73
800 ppm	890	73	917	78	973	80

Con los mismos datos obtenidos por la técnica de EIE en el software Nova 2.1 fue simulado el circuito eléctrico equivalente dando como resultado el diagrama que se muestra en la parte superior de la Figura 25.

En éste esquema del circuito eléctrico equivalente (CEE) se incluye la resistencia óhmica de la solución (Rs) en la interfaz electrodo de trabajo del metal/electrodo de referencia; mientras que resistencia de transferencia de carga o resistencia de polarización (Rct) puede dominar la velocidad de los procesos electroquímicos entre el electrodo y el electrolito o a través de la doble capa eléctrica (Cdl) (Tian et al., 2014; Othman et al., 2019).

7.10 Pérdida de peso de ECMP en Medio Alcalino

El análisis de pérdida de peso se efectuó a 298° K, en ausencia y presencia del ECMP a diferentes concentraciones durante 6 días. Los datos de eficiencia y velocidad de corrosión se muestran en la Tabla 21. Se puede observar que la eficiencia de inhibición aumenta con el aumento de la concentración hasta alcanzar 83% en concentraciones de 800 ppm.

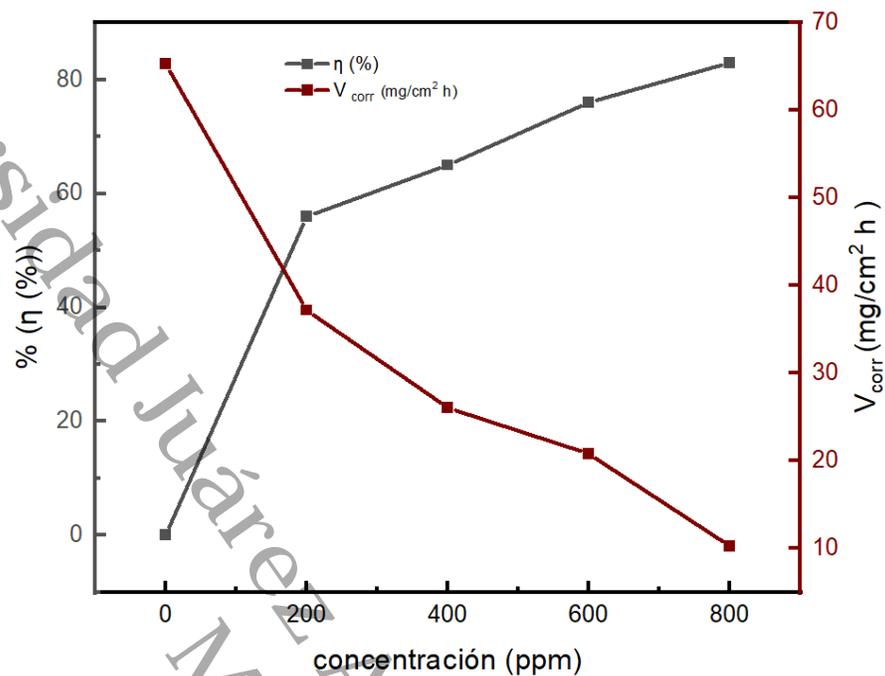
Tabla 21

Parámetros de corrosión de PP a diferentes concentraciones del ECMP en medio alcalino

Concentración (ppm)	V _{corr} (mg/cm ² h)	η (%)
0	65.289	0
200	37.173	56
400	26.037	65
600	20.812	76
800	10.263	83

Figura 26

Velocidad de corrosión (V_{corr}) del ECMP en medio alcalino



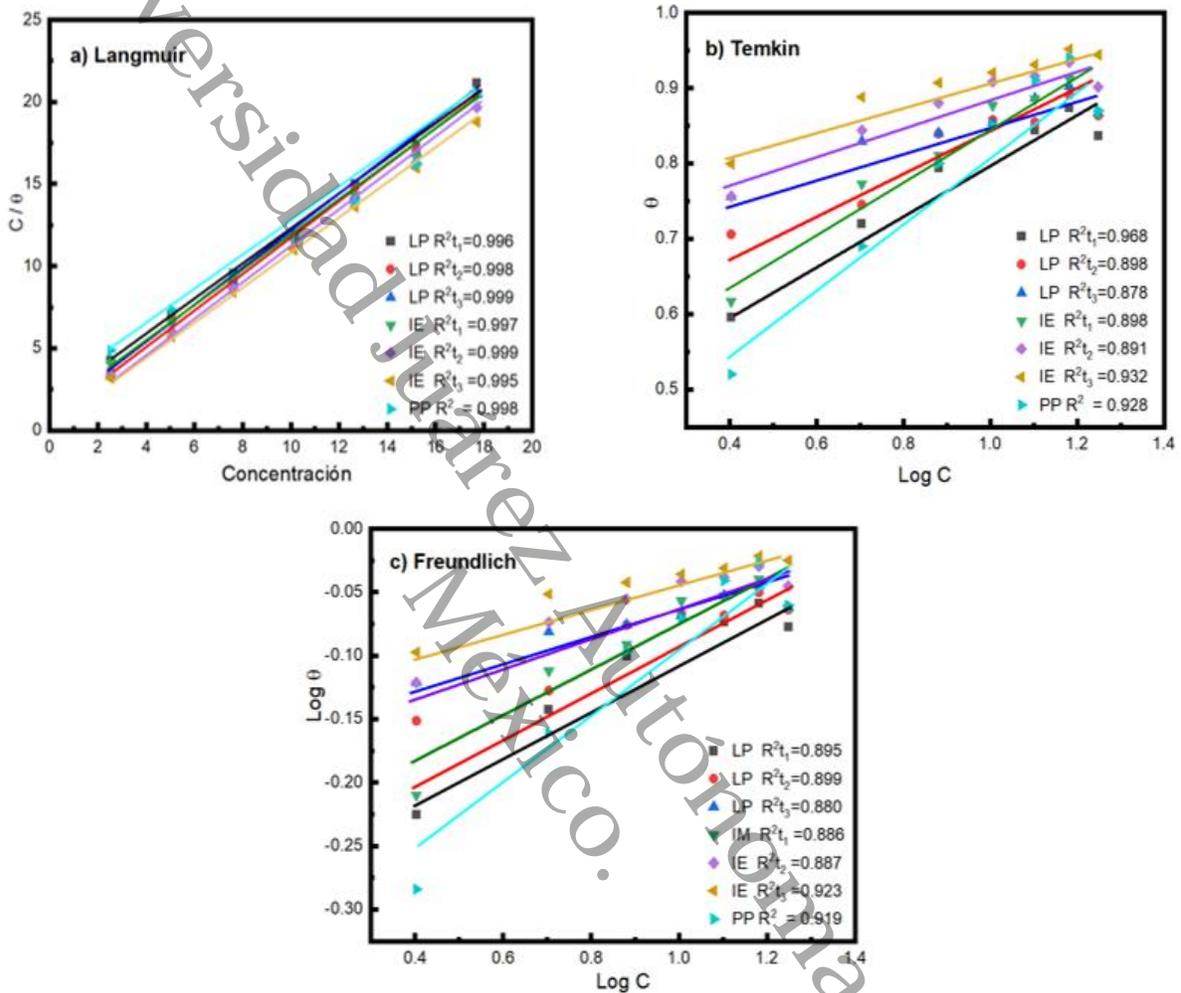
Nota: En el grafio se muestra la velocidad de corrosión y la eficiencia por cada incremento en la concentración.

En la Figura 26 se observa que, de acuerdo con el incremento de concentración del extracto, los valores de velocidad de corrosión (V_{corr}) disminuyeron, mientras que la eficiencia aumenta en concentración de 800 ppm, lo que implica que el ECMP inhibe la corrosión en el acero SAE 1010 en concentración 800 ppm en una solución de NaCl al 3.5%, alcanzando la menor velocidad de corrosión de 10.236 mg/cm² h en tiempos de inmersión de 6 días.

Se realizó el análisis de isothermas de adsorción de los resultados obtenidos en el medio ácido para el ECMP y el EHTS.

Figura 27

Isoterma de adsorción de a) Langmuir, b) Temkin y c) Freundlich, con los datos de la técnica de PPD, IE y PP para el EHTS



Nota: Las isothermas de Temkin y de Freundlich se encuentran en los valores aceptables.

En las Figuras 27a, 27b y 27c, se muestran los modelos de isoterma de adsorción de: Langmuir, Temkin y Freundlich del EHTS en medio ácido, de los isothermas mostrados el que mejor representa los datos experimentales fue el de Langmuir para las dos técnicas electroquímicas (EIE y PPD) y para la técnica PP del EHTS, la forma de la isoterma de adsorción puede ofrecer información valiosa sobre el mecanismo de adsorción del inhibidor y ayudar a evaluar el rendimiento de diversos inhibidores. Por ejemplo, una isoterma de Langmuir sugiere que el inhibidor se adhiere a la superficie metálica en una monocapa y se espera que sea altamente eficaz para prevenir la corrosión (Ahmed et al., 2023). Por

otro lado, una isoterma de Freundlich indica que la adsorción del inhibidor depende tanto de la concentración del inhibidor como del área superficial, lo que puede resultar en una menor eficacia a concentraciones más altas de inhibidor describir la adsorción reversible y no ideal sin limitarse a la formación de una monocapa (Nikpour et al., 2019; Conforti et al., 2024).

El coeficiente de correlación cuadrática, la intercepción, la pendiente y la constante de adsorción calculadas para los tres tipos de isotermas ajustadas en tres tiempos de inmersión diferentes utilizando datos de PPD se presenta en la Tabla 22. Los datos obtenidos por EIE (EHTS) se muestran en la Tabla 23

Tabla 22

Coeficiente de correlación cuadrática, intercepto y pendiente, calculados para los tres tipos de isotermas ajustadas a tres tiempos de inmersión diferentes por PPD

Modelo de isoterma	Tiempo de inmersión	(R ²)	Intercepción	Pendiente
Langmuir	1 h	0.997	1.256	1.085
	24h	0.999	0.603	1.087
	48 h	0.995	0.575	1.100
Temkin	1 h	0.898	0.519	0.317
	24h	0.891	0.698	0.219
	48 h	0.932	0.749	0.150
Freundlich	1 h	0.886	-0.262	0.189
	24h	0.887	-0.150	0.120
	48 h	0.923	-0.121	0.079

Tabla 23

Coefficiente de correlación cuadrática, intercepto y pendiente calculados para los tres tipos de isothermas ajustadas en tres tiempos de inmersión diferentes, de EIE (EHTS)

Modelo de isoterma	Tiempo de inmersión	(R ²)	Intercepción	Pendiente
Langmuir	1 h	0.997	1.256	1.047
	24h	0.999	0.603	1.053
	48 h	0.995	0.575	1.024
Temkin	1 h	0.898	0.519	0.323
	24h	0.891	0.698	0.084
	48 h	0.932	0.749	0.073
Freundlich	1 h	0.886	-0.262	0.185
	24h	0.887	-0.150	0.099
	48 h	0.923	-0.121	0.083

En el caso de los datos obtenidos por PP (EHTS), se muestra en la Tabla 24.

Tabla 24

Coefficiente de correlación cuadrático, intercepto y pendiente de PP (EHTS)

Modelo de isoterma	Tiempo de inmersión	(R ²)	Intercepto	Pendiente
Langmuir	6 días	0.998	2.213	0.967
Temkin	6 días	0.928	0.353	0.476
Freundlich	6 días	0.919	-0.376	0.290

Se confirma en las Tablas 22, 23 y 24 con valores de R² del orden de 0.995-0.999, que la isoterma que mejor representa los datos experimentales es la de Langmuir que muestra una relación lineal con un alto coeficiente de correlación. Se observa un aumento lineal en la cobertura de la superficie con la concentración para éste tipo de isoterma.

Se observa que el K_{ads} de la Tabla 25, aumenta con el tiempo de inmersión al igual que para los datos EIE y PPD. Se observa un aumento de K_{ads} a lo largo del tiempo, en el modelo de Langmuir, indicando una mayor capacidad de adsorción (Abdo et al., 2020; Ogunleye et al., 2020; Li et al., 2021).

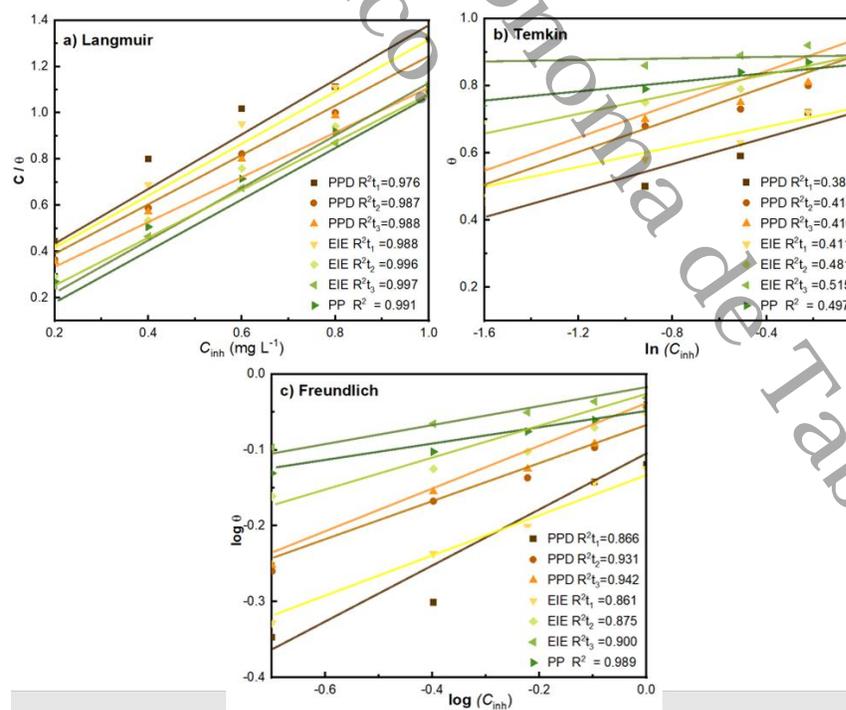
Tabla 25

K_{ads} calculada según la isoterma de Langmuir

Técnica electroquímica	Tiempo de inmersión	K_{ads} (L mol ⁻¹)
PPD	1 h	0.750
PPD	24h	1.070
PPD	48 h	1.770
EIE	1 h	0.796
EIE	24h	1.660
EIE	48 h	1.740
PP	1 h	0.451

Figura 28

Isotermas del ECMP ajustadas a modelos de: a) Langmuir b) Temkin y c) Freundlich



Nota: La isoterma de Temkin tiene valores inferiores para ser aceptables.

La línea ajustada de los coeficientes de regresión R^2 y la pendiente son cercanas al valor de la unidad para la isoterma de Langmuir en comparación con la isoterma de Temkin y Freundlich. El modelo de isoterma que mejor representa los datos experimentales fue el de Langmuir para las dos técnicas electroquímicas (EIE y PPD) y para la técnica PP (Figuras 28a, 28b, 28c). La linealidad del gráfico confirma que la adsorción de extracto se produce mediante un proceso de adsorción monocapa, donde cada molécula del extracto ocupa un sitio de adsorción específico en la superficie metálica, con interacciones mínimas entre las moléculas adsorbidas. A partir de la intersección, se calculó K_{ads} , obteniendo una constante de equilibrio de adsorción alta, indicativa de una fuerte adsorción de moléculas sobre la superficie metálica. Esto concuerda con estudios electroquímicos que informaron una alta eficiencia de inhibición (Ali et al., 2025).

Tabla 26

Parámetros calculados para los tres tipos de modelos de isoterma en tres tiempos de inmersión diferentes. Datos obtenidos por PPD

Extracto	Modelo de isoterma	Tiempo de inmersión	(R^2)	Intercepto	Slope
	PPD				
ECMP	Langmuir	1 h	0.976	0.321	1.026
		24 h	0.987	0.199	0.965
		48 h	0.988	0.193	0.949
	Temkin	1 h	0.381	0.734	0.200
		24 h	0.415	0.859	0.198
		48 h	0.416	0.877	0.201
	Freundlich	1 h	0.866	-0.130	0.342
		24 h	0.931	-0.061	0.284
		48 h	0.942	-0.052	0.282

Los isothermas de adsorción para la técnica de PPD, EIE y PP, se consideró que la isoterma de Langmuir tiene el mejor ajuste de coeficiente de correlación, el modelo describe que el proceso de inhibición es por adsorción monomolecular en el acero SAE 1010, en el caso del inhibidor de EHTS (Haris et al., 2019; Srivastava et al., 2019).

En la Tabla 27 se examinaron varias isothermas de adsorción para aclarar el comportamiento de adsorción de ECMP. Se puede observar que los valores de R^2 de Temkin son inferiores a los de Freundlich y Lagmuir para el caso de los tres tiempos de inmersión.

Tabla 27

Coeficiente de correlación cuadrática, intercepto y pendiente calculados para los tres tipos de modelos de isothermas en tres tiempos de inmersión diferentes. Datos obtenidos por EIE

	Modelo de isoterma (EIS)	tiempo de inmersión	(R^2)	Intercepto	Slope
ECMP	Langmuir	1 h	0.988	0.231	1.118
		24 h	0.996	0.106	1.037
		48 h	0.997	0.050	1.027
	Temkin	1 h	0.411	0.744	0.175
		24h	0.481	0.873	0.122
		48 h	0.515	0.933	0.082
	Freundlich	1 h	0.934	-0.123	0.292
		24 h	0.986	-0.057	0.156
		48 h	0.964	-0.029	0.095

El coeficiente de correlación cuadrática, intercepto, pendiente y constante de adsorción calculados para los tres tipos de isothermas ajustadas en tres tiempos de inmersión diferentes utilizando los datos de PP se muestran en la Tabla 28.

Los datos obtenidos de los parámetros de coeficiente de correlación cuadrática, el intercepto, la pendiente y la constante de adsorción por EIE se muestran en la Tabla 27.

Tabla 28

Coeficiente de correlación cuadrática, intercepto y pendiente, datos obtenidos por PP

Extracto	Modelo de isoterma	tiempo de inmersión (días)	(R ²)	Intercepto	Slope
ECMP	Langmuir	6	0.991	0.080	1.035
	Temkin	6	0.497	0.897	0.103
	Freundlich	6	0.878	-0.046	0.126

En el caso de los datos obtenidos de los parámetros por PP, se muestra en la Tabla 28.

La Tabla 28 confirman que los mejores coeficientes de correlación cuadrática corresponden a la isoterma de Langmuir, por lo que es la que mejor representa los datos experimentales.

Se observa un aumento lineal en la cobertura de la superficie con la concentración para éste tipo de isoterma. Con los valores estimados, la constante de adsorción de equilibrio (Kads) para la isoterma de Langmuir se puede calcular utilizando los datos de EIE, PPD y PP que se muestran en la Tabla 29. Para los datos de EIE y PPD se observa que Kads aumenta con el tiempo de inmersión. Se observa un aumento de Kads, lo que se atribuye a una mayor capacidad de adsorción (Pavlidou et al., 2015, Sabaa et al., 2022).

Tabla 29*K_{ads} calculados según la isoterma de Langmuir*

Extracto	Técnica de medición	tiempo de inmersión	K _{ads} (L mol ⁻¹)
ECMP	PPD	1 h	0.974
	PPD	24 h	1.036
	PPD	48 h	1.053
	IE	1 h	0.894
	IE	24 h	0.964
	IE	48 h	0.971
	PP	1 h	0.966

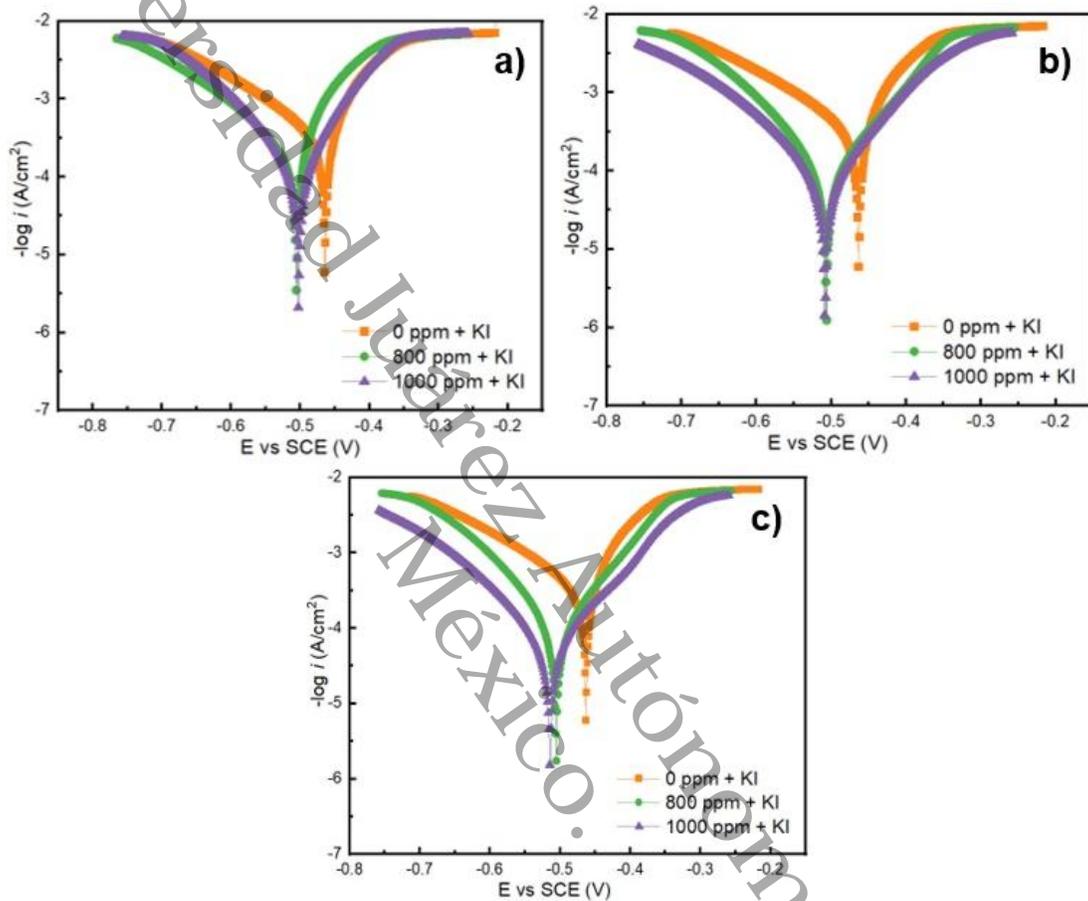
7.11 Adición de Aditivo Sinérgico del ECMP en Medio Ácido

Se realizó la adición de KI como aditivo sinérgico al ECMP en concentración de 800 y 1000 ppm en medio ácido siendo las dos concentraciones con mayor porcentaje de eficiencia. En las Figuras 29a, 29b y 29c, se muestran las curvas de Tafel para acero SAE 1010 en presencia de ECMP-KI, se observa un cambio a medida que aumenta la concentración de ECMP-KI en comparación con la curva en blanco. Los potenciales de corrosión son más negativos que el blanco.

Estos inhibidores forman una barrera o película sobre la superficie metálica, atenuando el proceso de corrosión y modificando la velocidad de las reacciones anódico-catódicas, disminuyendo la llegada o salida de especies de la superficie metálica o aumentando la resistencia eléctrica en la superficie metálica (Jayakumar et al., 2020c; Kaur et al., 2022).

Figura 29.

Curvas de PPD del ECMP-KI en medio ácido en tiempos de inmersión de: a) 1 h, b) 24 h y c) 48 h



Nota: Solo se muestran las concentraciones en donde se obtuvieron mayor porcentaje de eficiencia de la técnica de PPD.

La Tabla 28 muestra los parámetros electroquímicos, que se calcularon a partir de las curvas de PPD en diferentes concentraciones de ECMP-KI.

En el caso de los tiempos de inmersión t_1 , t_2 y t_3 , respecto a la solución en blanco sin inhibidor, la adición de ECMP en solución de HCl reduce la intensidad de la corriente de corrosión. A una concentración de 1000 ppm, la densidad de corriente de corrosión (i_{corr}) es 4.24, 3.74 y 3.60 $\mu\text{A cm}^{-2}$ en tres tiempos de inmersión de 1 h, 24h y 48 h. El potencial de corrosión respectivo (E_{corr}) es -503, -508 y -513 mV en tres tiempos de inmersión de 1 h, 24h y 48 h.

Tabla 30

Cambios en E_{corr} , I_{corr} , β_a , β_c , eficiencia (η) y cobertura (θ) de acero en medio ácido con y sin adición de ECMP-KI

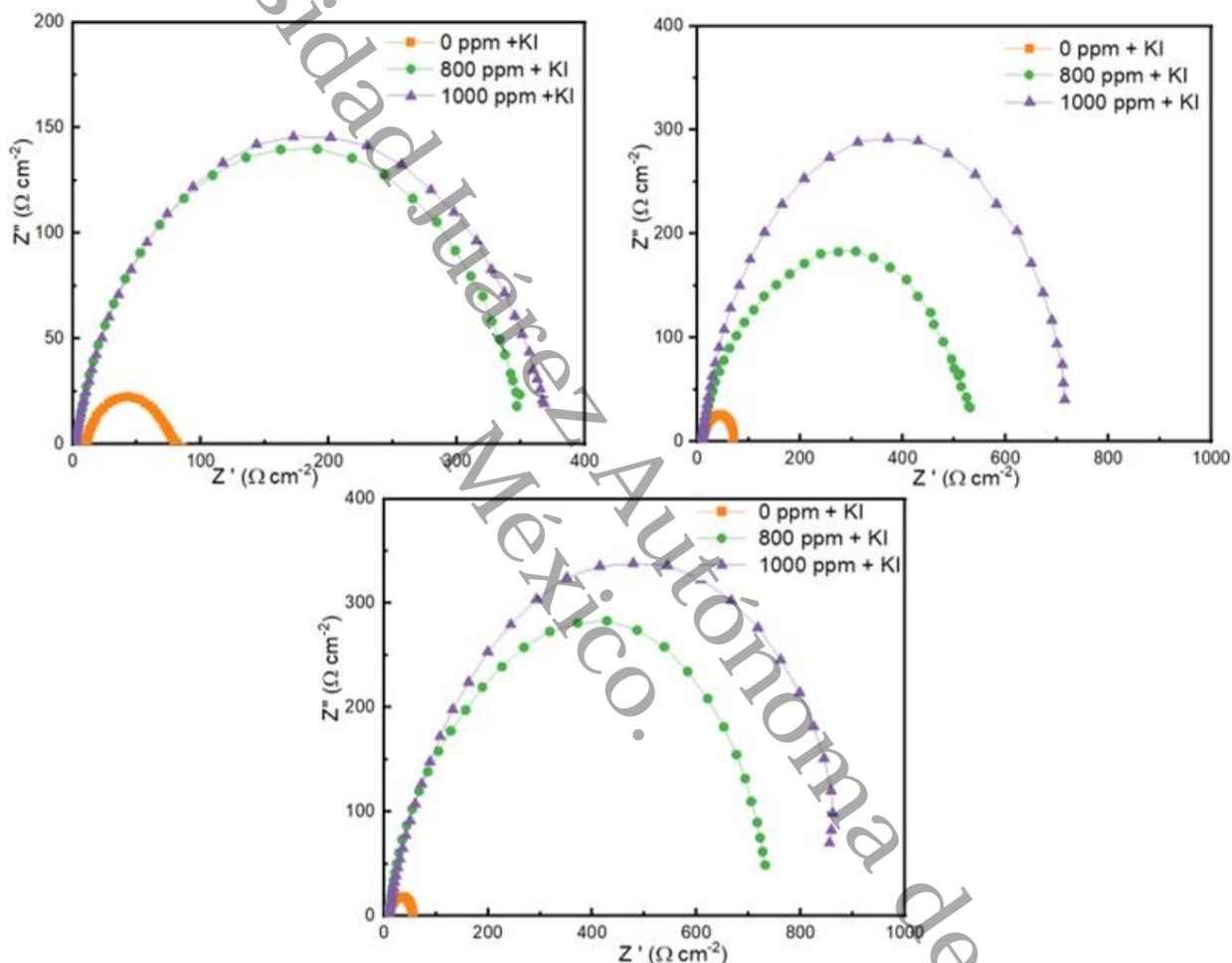
Concentración de Inhibidor (ppm+KI)	tiempos de inmersión	$-E_{corr}$ (V)	I_{corr} ($\mu A\ cm^{-2}$)	β_a	β_c	η	θ
				mV/dec	mV/dec	(%)	
Blanco	1 hora	461	19.17	0.126	0.175	0.00	0
	24h	463	32.98	0.279	0.488	0.00	0
	48 horas	464	36.90	0.426	0.608	0.00	0
800	1 hora	506	4.87	0.697	0.083	75	0.75
	24h	505	6.40	0.974	0.112	81	0.81
	48 horas	505	5.89	0.955	0.113	84	0.84
1000	1 hora	503	4.24	0.720	0.760	78	0.78
	24h	508	3.04	0.880	0.110	91	0.91
	48 horas	513	2.76	0.951	0.108	93	0.93

En presencia de ECMP, el potencial de corrosión (E_{corr}) se desplaza hacia la región anódica. La curva anódica es responsable de la oxidación del metal, mientras que la curva catódica es responsable del desprendimiento de hidrógeno en el medio ácido, sin embargo, para determinar el tipo de inhibidor, el desplazamiento debe ser inferior a ± 85 mV. Según los resultados de E_{corr} , el ECMP es un inhibidor de tipo mixto con un valor para ± 42 , ± 42 y ± 49 en tres tiempos de inmersión de 1 h, 24h y 48h. lo que reduce el fenómeno de la corrosión. Esto puede deberse a la adsorción de moléculas de ECMP en la superficie del acero dulce. La reducción significativa en la densidad de corriente de corrosión (I_{corr}) indica una disminución en la corrosión y un aumento en la eficiencia del inhibidor de ECMP. Por otro lado, la eficiencia aumenta con el tiempo de inmersión con ECMP de 76, 89 y 91

% y con ECMP-KI aumenta a 78, 89 y 90 % en tres tiempos de inmersión de 1 h, 24 h y 48 h.

Figura 30

Diagramas Nyquist del ECMP-KI en medio ácido, con tiempos de inmersión de: a) 1 h, b) 24 h y c) 48 h.



Nota: Solo se muestran las concentraciones en donde se obtuvieron mayor porcentaje de eficiencia con la técnica de EIE.

En la Figura 30 se muestran diagramas de Nyquist para las concentraciones de 0-800 y 1000 ppm del ECMP-KI en una solución de HCl, en tres tiempos de inmersión de $t_1=1$ h (Figura 30a), $t_2=24$ h (Figura 30b) y $t_3=48$ h (Figura 30c).

Por otro lado, se muestran los aumentos de eficiencias para el ECMP-KI en los tres tiempos de inmersión, siendo la máxima en $t_1=78\%$, $t_2=90\%$ y $t_3=94\%$ (ver Tabla 31).

Tabla 31

Rct y eficiencia de inhibición del acero SAE 1010 en solución de HCl 1M con adición de diferentes concentraciones del ECMP-KI en tres tiempos de inmersión

Concentración	Rct t_1	η_{t_1}	$S_1(t_1)$	Rct t_2	η_{t_2}	$S_1(t_2)$	Rct t_3	η_{t_3}	$S_1(t_3)$
(ppm)	($\Omega \text{ cm}^2$)	%		($\Omega \text{ cm}^2$)	%		($\Omega \text{ cm}^2$)	%	
0+KI	80	0	0	78	0	0	78	0	0
800+KI	347	77	1.64	531	86	1.25	732	93	1.16
1000+KI	368	78	1.66	715	90	1.30	856	94	1.17

En relación de la Tabla 31, se observa que para concentraciones de 1000 ppm a t_1 , la eficiencia aumento con el aditivo sinérgico de 75% a 78%, en el t_2 de 89% aumento a 90% y en t_3 de 93% incremento a 94%. Siendo muy poco el incremento de eficiencia.

Se puede observar que los valores de eficiencia aumentan ligeramente con la adición iones de yoduro a la solución que contiene ECMP al igual que el grado de cobertura de la superficie, en general se cumple la condición de $S_1 > 1$ lo que muestran un pequeño efecto sinérgico de los iones I^- (Djellab et al., 2019; Zhao et al., 2022), quizás debido a la alta eficiencia que se logra con el extracto sin adición de KI. También puede observarse que al aumentar el tiempo de inmersión aumenta la eficiencia, siendo mayor cuando se añade KI. Sin embargo, el aumento de la eficiencia es más significativo en el tiempo t_1 que en los tiempos t_2 y t_3 . Otros estudios han mostrado bucles (forma helicoidal) de manera similar. Indica que la corrosión del acero en solución ácida es controlada por el proceso de transferencia de carga en la interfase electrodo-solución, alcanzando un valor máximo de eficiencia del 95% en concentraciones de 500 ppm de extracto de ciprés de Arizona (Cherrad et al., 2020).

También, se han presentado en otras investigaciones que el aumento de diámetro de los bucles en el diagrama de Nyquist indica la formación de una película más capacitiva sobre la superficie metálica, favoreciendo la formación de una capa protectora, mostrando una mayor eficacia (91.88%) a la concentración 1000 ppm en el caso del extracto de romero y mayor eficiencia del 92% a 1000 ppm de extracto de mirto (Dhouibi et al., 2021).

Cuando se agregó KI a la solución del ECMP, se formaron iones de yoduro. Algunos sitios de la superficie del acero SAE 1010 pueden estar cargados positivamente. El I^- se adsorbe en dichos sitios de la superficie del metal y cambia la actividad interfacial, mientras

que los compuestos del ECMP pueden ser responsables del comportamiento hidrofóbico en la solución ácida (Djellab et al., 2019). Se observa el aumento de la eficiencia del inhibidor debido a la interacción de los componentes del inhibidor en la superficie y la posible interacción de las moléculas cargadas positivamente del inhibidor con los iones negativos del I^- adsorbidos en la superficie. La adición del KI al ECMP aumenta la eficiencia con respecto a cuando se usa solamente el ECMP.

En la Tabla 32, se muestran algunos resultados reportados en la literatura en el que usaron aditivo sinérgico, observando que el haluro más utilizado para el efecto sinérgico es el KI por encima del KBr y KCl, las cantidades usadas varían según el espécimen a estudiar, sin embargo, la eficiencia puede variar del 3 % hasta 32%, mientras que la adición del KI de éste trabajo se obtuvo un incremento del 5%.

Tabla 32

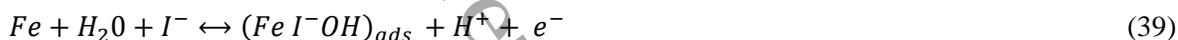
Resultados reportados en la literatura sobre inhibidor de corrosión con aditivos sinérgicos

Espécimen	Medio	Concentración del extracto	Eficiencia %	Aditivo	Eficiencia %	Referencia
Tanino de mangle	HCl	3 gL ⁻¹	89	0.1 M KI	94	(Adam et al., 2015)
Tanino mi mosa	0.5M	3 gL ⁻¹	82		94	
Tanino de castaño		2 gL ⁻¹	73		93	
Hojas de morus	HCl	0.4 g/L	93	10 mM KI	96	(Jokar et al., 2016)
Alba pendula	1M					
Pennisetum purpureum	HCl	5 g/L	90.93	0.1 mol L ⁻¹ KI	96.42	(Ituen et al., 2016)
Goma arábica	H ₂ SO ₄ 0.5M	2 gL ⁻¹	50	0.1mM	57	(Djellab et al., 2018a)
				KBr,	62	
				0.1mM KCl	98	
				0.5mM KI		
Cáscara de arroz	H ₂ SO ₄ 1M	1250 ppm	70.2	50 ppm KI	78.88	(Pramudita et al., 2019)
Corteza de Schinus molle	H ₂ SO ₄ 0.5M	3 g/L	62	2mM KI	94	(Djellab et al., 2020)
Cáscara de <i>Musa paradisiaca</i>	HCl 1M	1000 ppm	75	100 ppm KI	80	Éste trabajo

El aditivo sinérgico para éste trabajo fue 100 ppm de una disolución del 0.1 μL de KI lo cual es mas baja que en los trabajos reportados de la Tabla 31.

Estudios similares han mostrado que los valores de impedancia disminuyen en tiempos menores de inmersión, observándose que, al aumentar el tiempo de inmersión, los valores de R_{cp} disminuyen gradualmente hasta alcanzar una cantidad constante, que se atribuye a la rápida adsorción del inhibidor y a la difusión del electrolito a través del tiempo (Djellab et al., 2018).

En la Ecuación 39, 40 y 41 se muestra el mecanismo de adsorción superficial, la presencia de I^- en medio ácido aumenta la eficiencia de algunos compuestos orgánicos, donde los aniones ioduro se adsorben y facilitan la llegada de los cationes orgánicos a la superficie, dando como resultado un aumento en la cobertura superficial (Pramudita et al., 2019; Kaghazchi et al., 2021).



La Tabla 33 muestra los valores de cobertura de área superficial (θ) y los valores de capacitancia de doble capa (C_{dl}), para los tres tiempos de inmersión en diferentes concentraciones de extracto de ECMP-KI.

Tabla 33

Cobertura superficial y capacidad de doble capa determinadas a diferentes concentraciones de extractos de ECMP con KI y tres diferentes tiempos de inmersión

Concentración (ppm+KI)	θt_1	$C_{dl, t1}$	θt_2	$C_{dl, t2}$	θt_3	$C_{dl, t3}$
		($\mu\text{F} / \text{cm}^2$)		($\mu\text{F} / \text{cm}^2$)		($\mu\text{F} / \text{cm}^2$)
0+KI	0	88.89	0	78.93	0	78.93
800+KI	0.77	4.26	0.86	1.98	0.93	0.77
1000+KI	0.78	3.77	0.9	0.908	0.94	0.55

El grado de cobertura aumenta con el tiempo de inmersión, alcanzando valores máximos para 0.80, 0.91 y 0.94. El aumento de R_{ct} se atribuye con el aumento de la cobertura superficial de las moléculas de ECMP en la superficie del electrodo. La capacitancia de doble capa disminuye 3.77, 0.908 y 0.55 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ con el tiempo de inmersión de 1 h, 24 h y 48 h.

De acuerdo con la literatura, los cambios de composición de inhibidor pueden aumentar la estabilidad y el rendimiento, la limitante para comprender el mecanismo de inhibición de corrosión por inhibidores orgánicos son los rangos de concentración y la dificultad para monitorear el proceso en la interfaz del fluido-metal (GK et al., 2021).

Los valores R_{ct} se pueden utilizar para caracterizar el grado de dificultad de transferencia de carga en relación con la interfaz solución-metal. Las moléculas ECMP crean una película adsorbida en la superficie. El aumento en R_{ct} cuando aumenta la concentración de ECMP se puede atribuir al aumento en la cobertura de la superficie por las moléculas de ECMP (Fernández et al., 2019; Lin et al., 2021).

7.12 Caracterización de superficies del acero con el EHTS en medio ácido

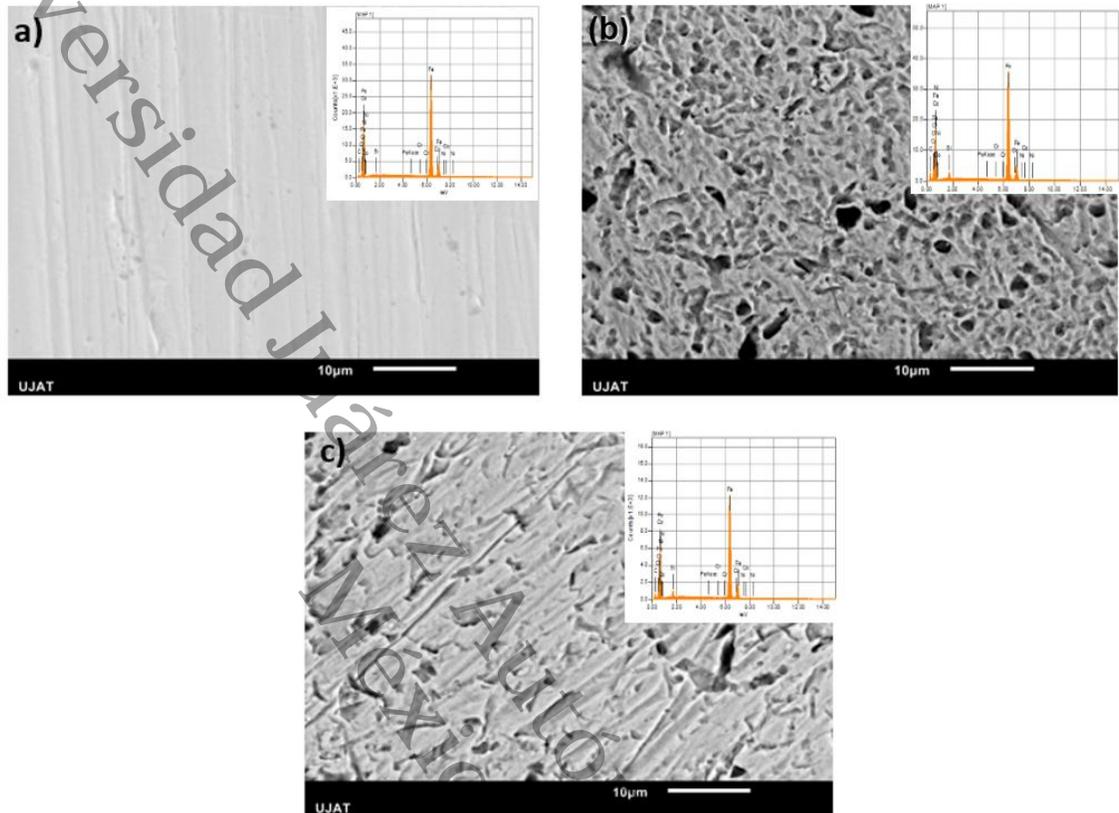
La morfología de la superficie de acero limpia y pulida se muestra en la Figura 31a. Solo se observan pequeñas líneas correspondientes al procedimiento de pulido. El espectro EDS muestra los picos correspondientes a Fe (98,70%). La Figura 31b muestra la superficie del acero después de 48 h de inmersión en solución de HCl 1M.

Se observa una superficie muy rugosa y el EDS muestra la presencia de Fe (76,45%) y la presencia de oxígeno (6,74%), quizás debido a un óxido formado en la superficie. Sin embargo, cuando se agregan 1200 ppm EHTS a la solución de HCl 1 M, se observa un ataque significativamente menor con respecto a la solución de HCl limpia (Figura 31c).

Se observa la presencia de Fe (91,55%), sin presencia de pico correspondiente a oxígeno en el espectro EDS. El EHTS contiene compuestos que se adsorben y, a su vez, minimizan la formación de productos corrosivos en la superficie del acero. Se observa la presencia de Fe (91,55%), sin presencia de pico correspondiente a oxígeno en el espectro EDS.

Figura 31.

SEM-EDS del acero: a) superficie limpia y pulida, b) sumergido en solución de HCl sin inhibidor y c) sumergido en HCl con adición de 1200 ppm de EHTS



Nota: Solo se muestran la concentración en donde se obtuvo mayor porcentaje de eficiencia.

7.13 Caracterización de Superficies del Acero con el ECMP en Medio Ácido

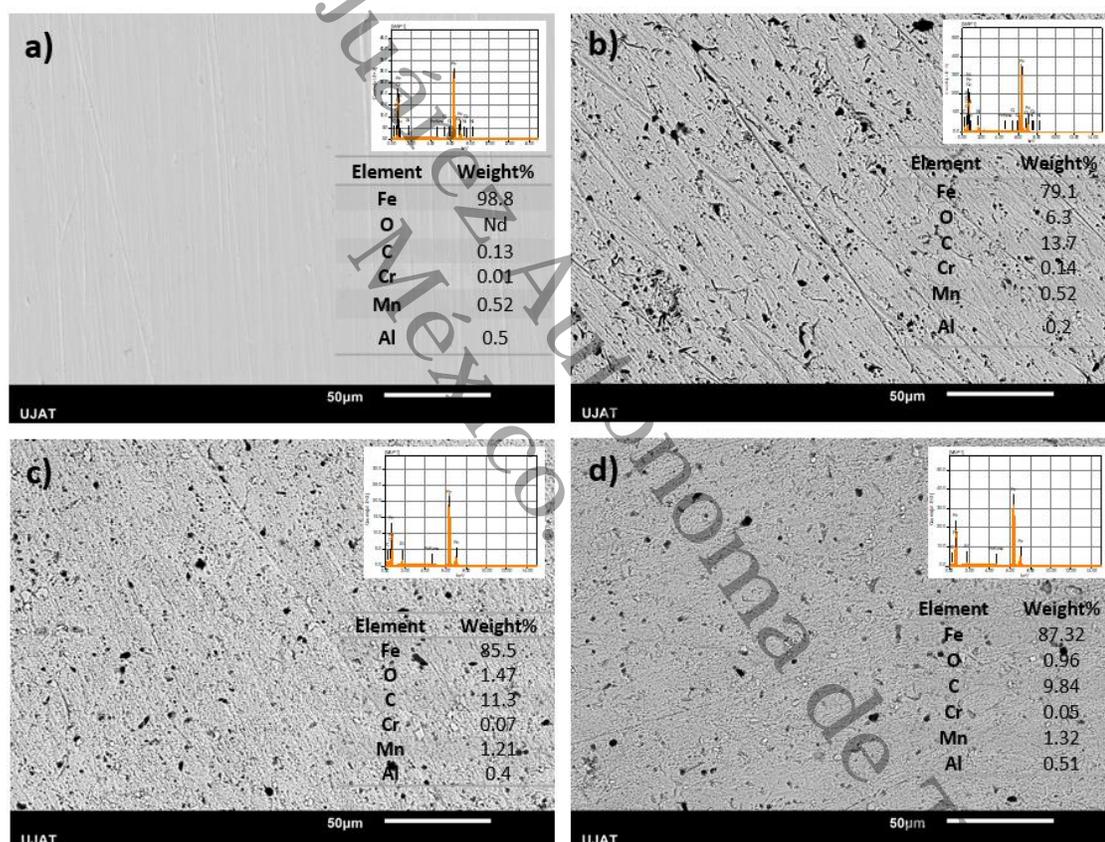
Los cambios morfológicos en la superficie del metal se monitorearon utilizando un microscopio electrónico de barrido. La composición elemental de la superficie se determinó mediante caracterización EDX a las 48 h de tiempo de inmersión. En la Figura 32a se presenta la morfología del acero pulido antes de ser expuesto al ambiente corrosivo con HCl, el acero no presenta daños ni grietas, sin embargo, cuando se sumerge en la solución de HCl 1M, la superficie se vuelve rugosa (Fig. 32b) con la presencia de oxígeno de acuerdo con lo que se observa en el porcentaje peso. Cuando se agrega 1000 ppm del ECMP, el daño observado en la superficie del acero es menor (Fig. 32c).

Cuando se agrega 1000 ppm del ECMP y 100 ppm de solución del KI el daño en la superficie del acero es menor. Significa que el inhibidor de ECMP contiene compuestos

que se adsorben y, a su vez, minimiza la formación de productos corrosivos en la superficie del acero, que a su vez con la presencia del KI aumenta un pequeño porcentaje de eficiencia (Figura 30d). Las cargas superficiales sobre el metal inducen la ocurrencia del fenómeno de corrosión y, al mismo tiempo, favorecen la adsorción de iones de cloruro de la solución de HCl (Ladha et al., 2018).

Figura 32.

SEM-EDX en tiempos de inmersión de HCl de 48 h del acero a) limpia y pulida, b) después de la inmersión, c) en inmersión a 1000 ppm del ECMP y d) en inmersión de 1000 ppm+KI



Nota: Solo se muestran la concentración en donde se obtuvo mayor porcentaje de eficiencia

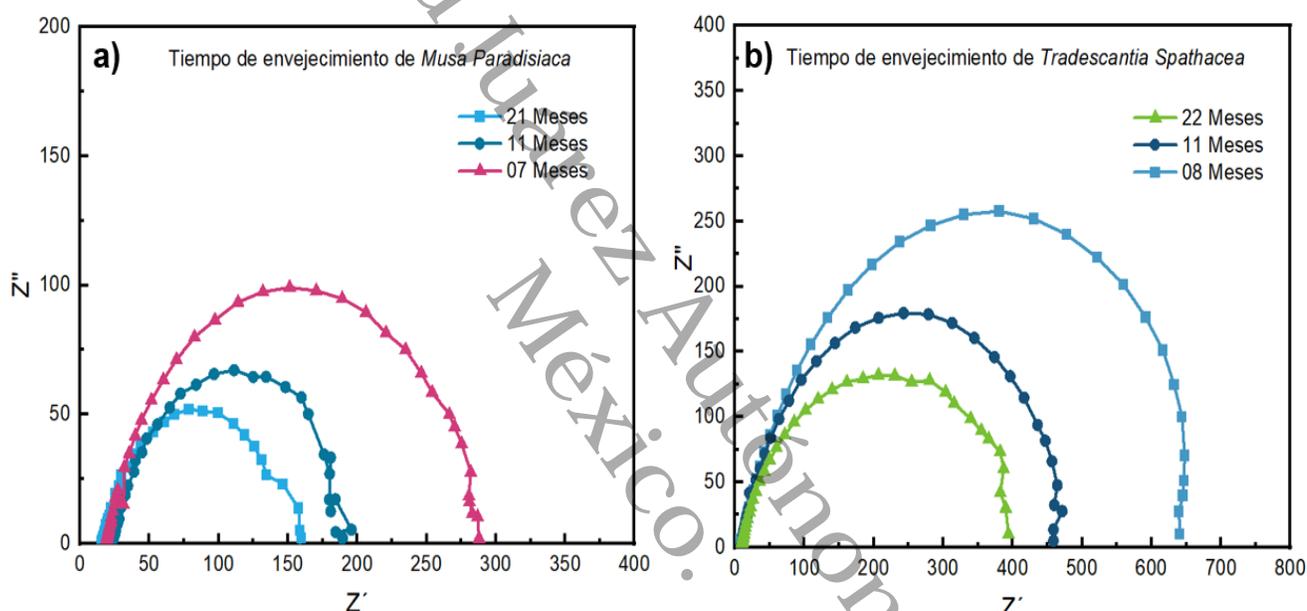
7.14 Pruebas de Envejecimiento para el ECMP y el EHTS en Medio Ácido

En la Figura 33a se muestra el diagrama de Nyquist de los ECMP reservados en tiempos de 7, 11 y 21 meses en tiempos de inmersión de 1 h en concentración de 1000

ppm porque es la concentración donde se obtuvo la máxima eficiencia en los estudios previos. Mientras que en la Figura 33b se muestran el diagrama de Nyquist de los EHTS reservados en tiempos de 8, 11 y 22 meses en tiempos de inmersión de 1 h en concentración de 1200 ppm porque es la concentración donde se obtuvo la máxima eficiencia en los estudios previos.

Figura 33

Diagramas de Nyquist a concentraciones de 1000 ppm en solución ácida del: a) ECMP de 1 h de inmersión y b) a concentraciones de 1200 ppm del EHTS de 1 h de inmersión



Nota: Solo se muestran la concentración en donde se obtuvo mayor porcentaje de eficiencia en los t_1 , t_2 y t_3 .

En la Tabla 34 se observan los parámetros obtenidos del diagrama de Nyquist de las muestras reservadas de ECMP, los valores reportados anteriormente mostraron máxima eficiencia del 75% en concentraciones de 1000 ppm, sin embargo, de acuerdo con el tiempo de reservación estas eficiencias han ido disminuyendo hasta 54% en tiempos de reservas de 21 meses, de igual forma se observan que las muestras reservadas de EHTS, en reportes anteriores los valores reportados mostraron máxima eficiencia del 91% en concentraciones de 1200 ppm, sin embargo, de acuerdo con el tiempo de reservación estas eficiencias han ido disminuyendo hasta 81% en tiempos de reservas de 22 meses.

Tabla 34*Parámetros para el acero 1010 en solución ácida con el ECMP y EHTS*

Concentración	Valores reportados		Reservado 7 meses		Reservado 11 meses		Reservado 21 meses	
	Rct	η	Rct	η	Rct	η	Rct	η
1000 ppm								
ECMP	289.61	75%	287.81	74%	189.48	61%	159.76	54%
1200 ppm								
EHTS	832.97	91%	640.73	89%	458.78	84%	394.26	81%

En la Tabla 35 se muestra un resumen de los resultados del análisis de Cromatografía de Gas acoplada con Espectrometría de Masas GC-MS para el ECMP, se puede observar en particular la presencia de dos compuestos en todas las muestras que fueron $C_{18}H_{36}O_2$ (octadecanal), y $C_{16}H_{32}O_2$ (ácido palmítico), que tienen características que indican que pueden ser un inhibidor de corrosión.

Tabla 35

Resultados de Cromatografía GC-MS en solución ácida del ECMP

Valores reportados			Reservas de 7 meses			Reservas de 11 meses			Reservas de 21 meses		
Formula	Tiempo (min)	% Área									
C ₁₀ H ₂₂ O	2.867	3.11	C ₂₂ H ₄₂ O ₂	19.91	4.29	C ₂₂ H ₄₂ O ₂	17.608	34.20	C ₂₂ H ₄₂ O ₂	17.615	12.00
C ₃ H ₈ O ₃	3.415	6.4	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	16.156	11.33	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	16.139	7.36	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	16.142	7.53
C ₆ H ₆ O	3.515	6.55	C ₈ H ₁₆ O ₂	16.415	1.24	C ₈ H ₁₆ O ₂	16.406	1.20	C ₃₂ H ₅₂ O ₂	22.538	28.18
C ₄ H ₆ O ₃	3.706	0.9	C ₂₀ H ₃₈ O ₂	19.048	3.82	C ₂₀ H ₃₈ O ₂	19.037	3.25	C ₆ H ₈ O ₄	3.605	2.14
C ₆ H ₁₀ O	9.2	5.57	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	17.789	9.90	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	17.778	10.73	C ₆ H ₈ O ₄	5.847	14.12
C ₁₄ H ₂₂ O	13.071	3.66	C ₃₉ H ₇₆ O ₅	18.736	0.60	C ₃₂ H ₅₂ O ₂	22.502	7.80	C ₁₈ H ₃₂ O ₂	17.575	5.14
C ₃₁ H ₄₈ O ₂	13.612	3.44	C ₂₂ H ₃₈ O ₂	19.885	3.30	C ₁₈ H ₃₂ O ₂	17.575	27.96	C ₃₁ H ₅₂ O	22.342	30.84
C ₁₈ H ₃₆ O ₂	15.304	11.02	C ₂₀ H ₃₈ O ₂	17.626	61.40	C ₁₆ H ₂₂ O ₄	15.177	1.92			
C ₁₆ H ₃₂ O ₂	16.786	6.33	C ₂₉ H ₄₈ O	20.798	1.03	C ₂₈ H ₄₈	22.325	5.58			
C ₁₈ H ₃₄ O ₂	18.54	4.18	C ₂₃ H ₄₂ O ₂	21.124	0.67						
C ₂₁ H ₄₀ O	20.319	2.88	C ₂₉ H ₅₀ O	21.754	2.37						
C ₂₀ H ₂₆	20.488	1.75									

En la Tabla 36 se muestra un resumen de los resultados del análisis de Cromatografía de Gas acoplada con Espectrometría de Masas GC-MS para el EHTS, se puede observar la presencia de cinco compuestos lineales en común, siendo: C₆H₈O₄, C₁₆H₃₂O₂, C₁₁H₁₆O₃, C₁₈H₃₆O₂ y C₂₂H₄₂O₂, que tienen características que indican que pueden ser un inhibidor de corrosión.

Estudios de Ogunleye et al. (2020), definen que los extractos son considerados con potencial de inhibidor de corrosión cuando se presenta; hidroxilo, fenoles y ácidos carboxílicos

como la molécula de $C_{12}H_{24}O_2$ y $C_{16}H_{32}O_2$ que también se identifica en la Tabla 33 y 34 de éste trabajo (Ogunleye et al., 2020).

Tabla 36

Resultados de Cromatografía GC-MS en solución ácida del EHTS

Valores reportados			Reservas de 8 meses			Reservas de 11 meses			Reservas de 22 meses		
Formula	Tiempo (min)	% Área	Formula	Tiempo (min)	% Área	Formula	Tiempo (min)	% Área	Formula	Tiempo (min)	% Área
$C_{11}H_{16}O_3$	3.14	3.94	$C_6H_8O_4$	3.55	5.65	$C_8H_{18}O_3$	3.914	0.74	$C_7H_{14}O_2$	5.383	92.33
C_6H_6O	3.49	28.31	$C_5H_8O_3$	5.69	3.40	$C_7H_{14}O_2$	5.17	1.05	$C_6H_8O_4$	5.841	1.85
$C_6H_6O_3$	6.62	13.65	$C_5H_4O_2$	5.82	46.65	$C_7H_{14}O_2$	5.534	85.35	$C_{11}H_{16}O_3$	14.319	1.71
C_7H_5NS	6.85	14.68	$C_{10}H_{18}O$	6.40	2.72	$C_6H_8O_4$	5.825	2.45	$C_{16}H_{32}O_2$	16.134	0.66
$C_6H_8N_2O$	6.92	1.1	$C_{16}H_{32}O_2$	16.13	4.22	$C_{11}H_{16}O_3$	14.326	0.63	$C_{18}H_{32}O_2$	17.565	0.96
$C_9H_{10}O_2$	7.75	3.66	$C_{18}H_{32}O_2$	17.56	5.18	$C_{18}H_{32}O_2$	17.565	0.24	$C_{22}H_{42}O_2$	17.609	2.48
$C_{16}H_{32}O_2$	15.89	2.95	$C_{22}H_{42}O_2$	17.60	13.33	$C_{22}H_{42}O_2$	17.608	0.78			
$C_{16}H_{34}O_3$	17.19	3.58	$C_{24}H_{38}O_4$	20.25	1.75	$C_{31}H_{52}O$	22.327	7.26			
$C_{17}H_{36}N_2O$	19.31	4.76	$C_{31}H_{52}O$	22.31	6.43	$C_{32}H_{52}O_2$	22.508	1.49			
$C_{11}H_{16}O_3$	3.14	3.94	$C_{32}H_{52}O_2$	22.49	10.67						

De acuerdo con los resultados obtenidos se puede mencionar que para éste trabajo no solo es una molécula que está dando el efecto inhibitor si no es un conjunto de moléculas presentes. En el caso del EHTS la gran mayoría de las moléculas que forman el extracto son aromáticas y algunas contienen átomos de oxígeno y nitrógeno, por lo que es probable que el mecanismo de inhibición principal sea a través de enlaces de las moléculas aromáticas con los átomos metálicos y por enlaces con los pares de electrones libres de los heteroátomos. Dada las múltiples moléculas contenidas en el extracto, es lógico pensar que la mayoría o el total de ellas pueden presentar capacidad inhibitoria y, por tanto, es muy probable que exista una adsorción competitiva de las diferentes moléculas en la superficie que sea la causa del efecto inhibitor.

Es de notar que después de 8 meses de almacenamiento las moléculas que componen el extracto son totalmente diferentes a las iniciales, aunque la mayoría mantienen su aromaticidad y su contenido de átomos de nitrógeno y oxígeno. Al mismo tiempo la eficiencia inhibidora máxima disminuye ligeramente a la concentración de 1200 ppm (91.31 % inicial determinado por PPD a 89 % a los ocho meses, la misma tendencia se mantiene en las determinaciones de EIE y PP). A tiempos mayores de almacenamiento continúa un descenso de la eficiencia inhibidora y también disminuye la aromaticidad de las moléculas contenidas en el extracto (11 meses 84%, 21 meses 81%). A pesar de la disminución de la eficiencia inhibidora con el tiempo, los valores resultan bastante aceptables pues todos sobrepasan el 80 %. Es de destacar que la composición del extracto varía sustancialmente con el tiempo; no obstante, al parecer las propiedades inhibidoras de las moléculas que se van formando se mantiene en un rango aceptable. En los inhibidores verdes es habitual que existan numerosas moléculas con bastante actividad química o electroquímica, lo que puede provocar cambios significativos con el tiempo.

Se reporta que el extracto de tomate resulta un inhibidor muy eficiente del acero en medio industrial (Vorobyova et al., 2022). Se destaca que en los últimos años se ha comprendido mejor el proceso de inhibición de extractos de plantas teniendo en consideración la complejidad de las transformaciones químicas entre las moléculas que lo componen. Entre algunos aspectos se plantea que la presencia de iones metálicos como el Fe^{2+} puede facilitar la formación de una estructura polimérica superficial sobre el metal y después de unas horas de inmersión en solución, el tiempo necesario para la formación de dicha estructura, aumenta significativamente la eficiencia del inhibidor. En el caso del extracto de EHTS a 48 horas de inmersión en solución aumenta la eficiencia con el tiempo, pero no muy significativamente, por lo que si se forma una estructura polimérica sus propiedades protectoras no son tan significativas.

Actualmente, se considera que en los extractos naturales existen transformaciones químicas diversas en las moléculas componentes; sin embargo, si las nuevas moléculas formadas permanecen electroquímicamente activas pueden seguir actuando como inhibidores. Las moléculas recién transformadas tienen por lo general una gran tendencia a estar fuertemente unidas a la superficie metálica por los heteroátomos, grupos hidroxilos e interacciones π - π de los anillos aromáticos (Zim et al., 2023).

Las investigaciones actuales sobre los inhibidores naturales se enfocan fundamentalmente en la facilidad de obtención, bajo costo, facilidad de mantener su uso y biodegradación (Yum et al., 2022).

VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El extracto etanólico de la hoja de *Tradescantia spathacea* (EHTS) es un inhibidor de corrosión verde nuevo y eficiente para el acero en HCl 1M. El EHTS se comporta como un inhibidor de corrosión mixto. La eficiencia inhibitoria aumenta con el tiempo en solución. La composición química del extracto muestra la presencia de compuestos heterocíclicos que contienen átomos de oxígeno, nitrógeno y azufre, particularmente fenoles. Es muy probable que las propiedades inhibitorias se produzcan por una mezcla de diferentes moléculas, ya que casi todas podrían tener propiedades inhibitorias actuando de forma independiente. Los datos de eficiencia inhibitoria obtenidos por PPD y EIE se ajustaron a las isotermas de Langmuir, Temkin y Freundlich. La mejor isoterma se obtuvo para la isoterma de Langmuir. Con los datos obtenidos de la técnica de PPD y EIE, los datos se ajustan a una isoterma de Langmuir para el caso del EHTS en donde mostraron 91.31 % de eficiencia con la técnica de PPD y 95.16 % de eficiencia con la técnica de EIE, indicando que el o los compuestos que se adsorben tienen interacción entre sí y forman una capa monomolecular sobre la superficie del acero.

Pueden ocurrir reacciones electroquímicas diferentes a las involucradas en la corrosión debido a la presencia de compuestos en el extracto que pueden oxidarse o reducirse. Ese es el caso de la oxidación parcial de polifenoles ya reportada para polifenoles contenidos en EHTS.

Para el caso del extracto de la cáscara de *Musa paradisiaca* (ECMP), los resultados del estudio de pérdida de peso (PP) mostraron 91 % de eficiencia, mientras que para la espectroscopía de impedancia electroquímica (EIE) y polarización potenciodinámica (PPD) mostraron mejor eficiencia de 91 % y 93.06%. Siendo algunos parámetros aceptados por la norma NRF 005-PEMEX-2000 para ser considerados como inhibidores de corrosión. Los resultados mostraron que la eficiencia se incrementa con el tiempo de inmersión del extracto de la *Musa paradisiaca* (ECMP) y del extracto de la hoja de *Tradescantia spathacea* (EHTS) en medio ácido. Por otro lado, con el período del envejecimiento se puede determinar el tiempo de almacenamiento, para el caso del EHTS el tiempo en donde la eficiencia disminuye de 1 % es de 8 meses mientras que, en el ECMP el tiempo en donde disminuye la eficiencia del 2% es de 7 meses. En éste trabajo se cumplieron con los objetivos específicos al desarrollar dos inhibidores de corrosión con ECMP y EHTS en diferentes medios, mientras que, de la hipótesis establecida en el Proyecto se puede mencionar que se cumplió parcialmente esto debido que el EHTS, el porcentaje de eficiencia disminuyó en el medio alcalino. Estos resultados sugieren que el ECMP es una opción sostenible y con gran potencial para la prevención de la corrosión, favoreciendo la valorización del residuo orgánico para ser utilizados en medio ácido y alcalino

mientras que para el EHTS es aun mas favorable en la prevención de la corrosión en medio ácido y se caracterizan por ser amigables con el medio ambiente.

Los trabajos futuros que se recomiendan realizar para la consolidación de esta investigación es:

- Utilizar otros métodos de extracción de compuestos naturales para obtener mayor concentración de los principios activos.
- Realizar las pruebas de técnicas electroquímicas con incremento de temperatura y concentración de ácido para simular el área industrial.
- Analizar algunas propiedades termodinámicas relacionadas con los isothermas de adsorción y aplicar otros modelos de isothermas.
- Aplicar la técnica de ruido electroquímico para cuantificar y confirmar eficazmente la eficiencia de la tasa de corrosión del extracto natural.
- Estudiar el envejecimiento de los extractos organicos para establecer los períodos de almacenamiento y garantizar el uso en la industria.

REFERENCIAS

- Abdo Ahmed, W., Al-Mashhadani, M. H., Abdallah, M., Hussain, Z., y Yousif, E. (2020). Sciences Eco-friendly green corrosion inhibitors in overview. *Research Journal in Advanced Sciences*, 7 (16). <https://orcid.org/0000-0001-8185-833X>
- Adam, M. R., Rahim, A. A., y Shah, A. M. (2015). Synergy between iodide ions and mangrove tannins as inhibitors of mild steel corrosion. *Annals of Forest Science*, 72(1). <https://doi.org/10.1007/s13595-014-0398-9>
- Adejo, S. O., Yiase, S. G., Gbertyo, J. A., y Ojah, E. O. (2018). Aspartic Acid as Corrosion Inhibitor of Mild Steel Corrosion Using Weight Loss, Acidimetry and EIS Measurement. In *Journal of Advances in Chemistry*, 15(2). <https://cirworld.com/index.php/jac>
- Agiriga, C. E., Oguzie, E., Chidiebere, A., Okorochoa, N. J., y Chikwe, R. N. (2020). Corrosion inhibition action of *Landolphia heudelotii* on mild steel in acidic media. *Pigment and Resin Technology*, 49(5), 387–392. <https://doi.org/10.1108/PRT-02-2019-0015>
- Ahmed A. Al., Wan N. R., y Waleed K.A. (2023). Corrosion Inhibitors: Natural and Synthetic Organic Inhibitors. *Journal Lubricants*, 11(174), 2-29. <https://doi.org/10.3390/lubricants11040174>
- Al-Amiery, A., Salman, T. A., Alazawi, K. F., Shaker, L. M., Kadhum, A. A. H., y Takriff, M. S. (2020). Quantum chemical elucidation on corrosion inhibition efficiency of Schiff base: DFT investigations supported by weight loss and SEM techniques. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 15(2), 202–209. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctz074>
- Al-Amiery, A., Shaker, L. M., Kadhum, A. A. H., y Takriff, M. S. (2020). Synthesis, characterization and gravimetric studies of novel triazole-based compound. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 15(2), 164–170. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctz067>
- Ali, H.A., Hakim, S.A., Ahmed A., y Lina S., (2025). Evaluation of the corrosion inhibition efficiency of 7-(Acetohydrazide-2-yloxy)-4-methylcoumarin in 1.0 M HCl: Experimental and theoretical approach. *Results in chemistry*, 14(2025) 102121. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2025.102121>

- Al-Moubaraki, A. H., y Obot, I. B. (2021). Top of the line corrosion: causes, mechanisms, and mitigation using corrosion inhibitors. *Arabian Journal of Chemistry*, 14(5). <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103116>
- Al-Nami, S. Y. (2021). Corrosion inhibition of low carbon steel in 1 M HCL solution by cephalixin monohydrate drug and synergistic iodide additives. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 11(1), 8550–8563. <https://doi.org/10.33263/BRIAC111.85508563>
- Alvarez, P. E., Fiori-Bimbi, M. V., Neske, A., Brandán, S. A., y Gervasi, C. A. (2018). Rollinia occidentalis extract as green corrosion inhibitor for carbon steel in HCl solution. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 58, 92–99. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2017.09.012>
- Badawi, A. K., y Fahim, I. S. (2021). A critical review on green corrosion inhibitors based on plant extracts: Advances and potential presence in the market. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, 10(4), 1385–1406. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2021-10-4-2>
- Barreto, L. S., Almeida, T. F., Santos, A.M., Tokumoto, M.S., Cotting, F., y Capelossi, V. R. (2021). Evaluation of vegetables residues as corrosion inhibitors. *Research, Society and Development*, 10(8), e28710817409. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i8.17409>
- Begum, A. S., Vahith, R. M., Kotra, V., Shaik, M. R., Abdelgawad, A., Awwad, E. M., y Khan, M. (2021). Spilanthes acmella leaves extract for corrosion inhibition in acid medium. *Coatings*, 11(1), 1–24. <https://doi.org/10.3390/coatings11010106>
- Benahmed, M., Djeddi, N., Akkal, S., y Laouar, H. (2016). Saccocalyx satureioides as corrosion inhibitor for carbon steel in acid solution. *International Journal of Industrial Chemistry*, 7(2), 109–120. <https://doi.org/10.1007/s40090-016-0082-z>
- Berezhnaya, A. G., Khudoleeva, E. S., y Chernyavina, V. V. (2021). Some imidazolines and their mixtures with inorganic anions as inhibitors of acid corrosion of steel. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, 10(2), 649–661. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2021-10-2-11>
- Bhuvanewari, T. K., Jeyaprabha, C., y Arulmathi, P. (2020). Corrosion inhibition of mild steel in hydrochloric acid by leaves extract of Tephrosia purpurea. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 34(22), 2424–2447. <https://doi.org/10.1080/01694243.2020.1766395>

- Bouknana, D., Hammouti, B., Serghini caid, H., Jodeh, S., Bouyanzer, A., Aouniti, A., y Warad, I. (2015). Aqueous extracts of olive roots, stems, and leaves as eco-friendly corrosion inhibitor for steel in 1 M HCl medium. *International Journal of Industrial Chemistry*, 6(4), 233–245. <https://doi.org/10.1007/s40090-015-0042-z>
- Byrne, C., Alessandro, D., Selmi, G., Deya, C., (2020). Study of the anticorrosive properties of “quebracho colorado” extract and its use in a primer for aluminum 1050. *Progress in Organic Coating*, 148 (20), 27-37. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105827>
- Cheirmakani, B. M., Schlenk, M., College, E., y Subburaj, B. (2019). Corrosion Inhibition of Mild Steel by using Banana Peel Extract Analysis View project Renewable energy utilization for sustainable development View project. In *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 6. <https://www.researchgate.net/publication/332523647>
- Cherrad, S., Jaouadi, I., el Aoufir, Y., Tiskar, M., Satrani, B., Ghanmi, M., Guenbour, A., y Chaouch, A. (2020). Unveiling corrosion inhibition properties of the cupressus arizonica leaves essential oil for carbon steel in 1.0 M HCl. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, 9(2), 607–622. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2020-9-2-15>
- Confortti, N. (2024). Avocado seed extract as an environmentally friendly corrosion inhibitor of steel in sulfuric acid. *Scientific initiation journal*, 11(1), 48-58. <https://doi.org/10.33412/rev-ric.vii.i.4123>
- Czaban, M. (2018). Aircraft corrosion - Review of corrosion processes and its effects in selected cases. *Fatigue of Aircraft Structures*, 18(10), 5–20. <https://doi.org/10.2478/fas-2018-0001>
- Devikala, S., Kamaraj, P., Arthanareeswari, M., y Pavithra, S. (2019). Green Corrosion inhibition of mild steel by Asafoetida extract extract in 3.5% NaCl. *Materials today*, 14(2), 590-601. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.04.183>
- Dhouibi, I., Masmoudi, F., Bouaziz, M., y Masmoudi, M. (2021). A study of the anti-corrosive effects of essential oils of rosemary and myrtle for copper corrosion in chloride media. *Arabian Journal of Chemistry*, 14(2). <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2020.102961>

- Djellab, M., Bentrach, H., Chala, A., y Taoui, H. (2019a). Synergistic effect of halide ions and gum arabic for the corrosion inhibition of API5L X70 pipeline steel in H₂SO₄. *Materials and Corrosion*, 70(1), 149–160. <https://doi.org/10.1002/maco.201810203>
- Djellab, M., Bentrach, H., Chala, A., Taoui, H., Kherief, S., y Bouamra, B. (2020). Synergistic effect of iodide ions and bark resin of Schinus molle for the corrosion inhibition of API5L X70 pipeline steel in H₂SO₄. *Materials and Corrosion*, 71(8), 1276–1288. <https://doi.org/10.1002/maco.202011533>
- Eka, D., Arifin, S., Muliastri, D., Rudiana, R., Nur, F., y Sari, I. (2021). Green Corrosion Inhibitors to Head Off the Corrosion Rate of ST 37 Steels. In *international journal of applied technology research*, 2(1), 21-28. <https://doi.org/10.35313/ijatr.v2i1.40>
- Ekemini A., Ashish K., Hassane L., Taiwo Q. S., Bindu M., Abhishek D., Etiénying E. (2024). Coordination compounds as corrosion inhibitors of metals: A review. *Coordination chemistry Reviews*, 499(15). <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2023.215503>
- El Ibrahim, B., Jmiai, A., Bazzi, L., y El Issami, S. (2020). Amino acids and their derivatives as corrosion inhibitors for metals and alloys. *Arabian Journal of Chemistry*, 13(1), 740–771. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2017.07.013>
- El Haddad, M. N., y Fouda, A. E. (2021). Evaluation of Curam drug as an ecofriendly corrosion inhibitor for protection of stainless steel-304 in hydrochloric acid solution: Chemical, electrochemical, and surface morphology studies. *Journal of the Chinese Chemical Society*, 68(5), 826–836. <https://doi.org/10.1002/jccs.202000409>
- Emran, K., Al-Ahmadi, A. O., Emran, K. M., Ahmed, N. M., Torjoman, B. A., Al-Ahmadi, A. A., y Sheekh, S. N. (2014). Cantaloupe Extracts as Eco Friendly Corrosion Inhibitors for Aluminum in acidic and alkaline solutions. *J. Mater*, 5(6), 1940–1950. <https://www.researchgate.net/publication/286317095>
- Faiz, M., Zahari, A., Awang, K., y Hussin, H. (2020). Corrosion inhibition on mild steel in 1 M HCl solution by: *Cryptocarya nigra* extracts and three of its constituents (alkaloids). *RSC Advances*, 10(11), 6547–6562. <https://doi.org/10.1039/c9ra05654h>
- Farahati, R., Mousavi-Khoshdel, S. M., Ghaffarinejad, A., y Behzadi, H. (2020). Experimental and computational study of penicillamine drug and cysteine as water-soluble green

- corrosion inhibitors of mild steel. *Progress in Organic Coatings*, 142. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105567>
- Gao, C., Zhao, X., Liu, K., Dong, X., Wang, S., y Kong, F. (2020). Construction of eco-friendly corrosion inhibitor lignin derivative with excellent corrosion-resistant behavior in hydrochloric acid solution. *Materials and Corrosion*, 71(11), 1903–1912. <https://doi.org/10.1002/maco.202011799>
- Gapsari, F., Darmadi, D. B., Setyarini, P. H., Izzuddin, H., Madurani, K. A., Tanji, A., y Hermawan, H. (2021). Nephelium lappaceum extract as an organic inhibitor to control the corrosion of carbon steel weldment in the acidic environment. *Sustainability (Switzerland)*, 13(21). <https://doi.org/10.3390/su132112135>
- GK, S., Jacob, J. M., P, R., y Raj, A. (2021). Synergistic effect of salts on the corrosion inhibitive action of plant extract: a review. In *Journal of Adhesion Science and Technology*, 35(2), 133–163. <https://doi.org/10.1080/01694243.2020.1797336>
- Haldhar, R., Prasad, D., y Bhardwaj, N. (2020b). Surface Adsorption and Corrosion Resistance Performance of Acacia concinna Pod Extract: An Efficient Inhibitor for Mild Steel in Acidic Environment. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45(1), 131–141. <https://doi.org/10.1007/s13369-019-04270-2>
- Haldhar, R., Prasad, D., Kamboj, D., Kaya, S., Dagdag, O., y Guo, L. (2021). Corrosion inhibition, surface adsorption and computational studies of Momordica charantia extract: a sustainable and green approach. *SN Applied Sciences*, 3(1). <https://doi.org/10.1007/s42452-020-04079-x>
- Haris, N. I. N., Sobri, S., Yusof, Y. A., y Kassim, N. (2019a). Oil palm empty fruit bunch extract and powder as an eco-friendly corrosion inhibitor for mild steel: A comparison study. *Materials and Corrosion*, 70(12), 2326–2333. <https://doi.org/10.1002/maco.201910959>
- Hartl, R., Praehofer, B., y Zaeh, M. F. (2020). Prediction of the surface quality of friction stir welds by the analysis of process data using Artificial Neural Networks. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 234(5), 732–751. <https://doi.org/10.1177/1464420719899685>
- He, Y., Ren, S., Wang, X., Young, D., Mohamed-Said, M., Santos, B. A. F., Dias Serenario, M. E., y Singer, M. (2024). Temperature Dependence of Adsorption and Effectiveness for a

Pyrimidinium-Type Corrosion Inhibitor on Mild Steel. *Corrosion*, 80(2), 177–186. <https://doi.org/10.5006/4346>

Hou, X., Jiao, C., Cui, Z., Yin, J., Tao, R., Wang, R., y Chen, C. (2022). Adsorption mechanism of a Phosphorus-Free Inhibitor for Circulation Cooling Systems. In *Highlights in Science, Engineering and Technology FBET*, 11(2022). <https://doi.org/10.54097/hset.v11i.1364>

Hu, Q., Qiu, Y., Zhang, G., y Guo, X. (2015). Capsella bursa-pastoris extract as an eco-friendly inhibitor on the corrosion of Q235 carbon steels in 1 mol·L⁻¹ hydrochloric acid. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 23(8), 1408–1415. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2015.05.002>

Ioana, D.G., Ecaterina, M., Sorin, A. (2025). Opment of Corrosion Inhibitors: Types, Mechanisms, Electrochemical Behavior, Efficiency, and Environmental Impact. *Technologies*, 13(3). <https://doi.org/10.3390/technologies13030103>

Ituen, E., James, A., Akaranta, O., y Sun, S. (2016). Eco-friendly corrosion inhibitor from Pennisetum purpureum biomass and synergistic intensifiers for mild steel. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 24(10), 1442–1447. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2016.04.028>

Jayakumar, S., Nandakumar, T., Vadivel, M., Thinaharan, C., George, R. P., y Philip, J. (2020a). Corrosion inhibition of mild steel in 1 M HCl using Tamarindus indica extract: electrochemical, surface and spectroscopic studies. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 34(7), 713–743. <https://doi.org/10.1080/01694243.2019.1681156>

Ji, G., Anjum, S., Sundaram, S., y Prakash, R. (2015a). *Musa paradisiaca* peel extract as green corrosion inhibitor for mild steel in HCl solution. *Corrosion Science*, 90, 107–117. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.10.002>

Jokar, M., Farahani, T. S., y Ramezanzadeh, B. (2016). Electrochemical and surface characterizations of morus alba pendula leaves extract (MAPLE) as a green corrosion inhibitor for steel in 1M HCl. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 63, 436–452. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2016.02.027>

Kaban, A. P. S., Ridhova, A., Priyotomo, G., Elya, B., Maksum, A., Sadeli, Y., Sutopo, Adityawarman, T., Riastuti, R., y Soedarsono, J. W. (2021). Development of white tea extract as green corrosion inhibitor in mild steel under 1 m hydrochloric acid solution.

Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2(6–110), 6–20.
<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.224435>

Kaghazchi, L., Naderi, R., y Ramezanzadeh, B. (2021). Synergistic mild steel corrosion mitigation in sodium chloride-containing solution utilizing various mixtures of phytic acid molecules and Zn^{2+} ions. *Journal of Molecular Liquids*, 323, 114589. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.114589>

Kaur, J., Daksh, N., y Saxena, A. (2022a). Corrosion Inhibition Applications of Natural and Eco-Friendly Corrosion Inhibitors on Steel in the Acidic Environment: An Overview. In *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47(1)1, 57–74. <https://doi.org/10.1007/s13369-021-05699-0>

Knyazeva, L. G., Tsygankova, L. E., Dorokhov, A. V., y Kur'yato, N. A. (2021). Protective efficiency of oil compositions with cortex VpCl-368D. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, 10(2), 551–561. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2021-10-2-4>

Koursaoui, L., Kerroum, Y., Tabyaoui, M., Guenbour, A., Bellaouchou, A., Satrani, B., Ghanmi, M., Warad, I., Chaouch, A., y Zarrouk, A. (2021). Chemical composition and inhibition effect of eucalyptus botryoides on the corrosion of C38 steel in hydrochloric acid solution. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 11(3), 10119–10130. <https://doi.org/10.33263/BRIAC113.1011910130>

Kumar, H., y Yadav, V. (2021). Highly efficient and eco-friendly acid corrosion inhibitor for mild steel: Experimental and theoretical study. *Journal of Molecular Liquids*, 335. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.116220>

Kurtela, M., Šimunović, V., Stojanović, I., y Alar, V. (2020). Effect of the cerium (III) chloride heptahydrate on the corrosion inhibition of aluminum alloy. *Materials and Corrosion*, 71(1), 125–147. <https://doi.org/10.1002/maco.201911057>

Kushwah, R., y Pathak, R. K. (2020). Open Circuit Potential, Polarization and Thermometric Study of Guar Gum as Corrosion Inhibitor on Mild Steel by in Acidic Media. *Asian Journal of Chemical Sciences*, 8(2), 55–60. <https://doi.org/10.9734/ajocs/2020/v8i219040>

Kwolek, P., Mrówka-Nowotnik, G., y Wytrwal-Sarna, M. (2021). Corrosion of structural constituents of 2017 aluminium alloy in acidic solutions containing inhibitors. *Materials and Corrosion*, 72(5), 888–903. <https://doi.org/10.1002/maco.202012046>

- Ladha, D. G., Shah, N. K., Ghelichkhah, Z., Obot, I. B., Khorrami Dehkharghani, F., Yao, J. Z., y Macdonald, D. D. (2018). Experimental and computational evaluation of illicium verum as a novel eco-friendly corrosion inhibitor for aluminium. *Materials and Corrosion*, 69(1), 125–139. <https://doi.org/10.1002/maco.201709581>
- Li, H., Zhang, S., y Qiang, Y. (2021a). Corrosion retardation effect of a green cauliflower extract on copper in H₂SO₄ solution: Electrochemical and theoretical explorations. *Journal of Molecular Liquids*, 321, 114450. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.114450>
- Lin, B. lan, Shao, J. jie, Xu, Y. ye, Lai, Y. ming, y Zhao, Z. ning. (2021). Adsorption and corrosion of renewable inhibitor of Pomelo peel extract for mild steel in phosphoric acid solution. *Arabian Journal of Chemistry*, 14(5). <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103114>
- Liu, C., Yu, J., y Sun, S. (2019). Corrosion inhibition of LY12CZ aluminum alloy by 3-pyridyl-4-amino-1,2,4-triazole-5-thiol and its cerium nitrate compound. *Materials and Corrosion*, 70(6), 1120–1130. <https://doi.org/10.1002/maco.201810660>
- Majeed, E., y Deepak, E. (2018). An Experimental Investigation of Rice Husk ash and Waste Paper Sludge ash as Partial Replacement of Cement in Concrete. *International Journal on Emerging Technologies*, 9(2), 23–26. <https://doi.org/10.22214.7ijraset.2018.7022>
- Malak, R., Mohammed, B., Said, A., Bouchra, Benzidia., Moussaoui, S., Bikri, S., Rachid, H., Hind, H., Hamid, E., Hajjaji, N. (2023). Development of a promising nontoxic corrosion inhibitor based on *Opuntia dillenii* seed oil for iron corrosion in 3Wt% NaCl: Experimental and theoretical approaches. *Chemical Data Collections*, 46, 101037. <https://doi.org/10.1016/j.cdc.2023.101037>
- Manantapong, P., Chaipunya, N., Wannapaiboon, S., Chirawatkul, P., Wattanathana, W., y Hanlumyuang, Y. (2020b). Efficiency of organic corrosion inhibitors derived from Thai-bael fruit extract for preventing corrosion in carbon steels. *Asian Journal of Chemistry*, 32(8), 2043–2050. <https://doi.org/10.14233/ajchem.2020.22743>
- Mandujano-Ruiz, A., Morales-Hernández, J., Herrera-Hernández, H., Corona-Almazán, L. E., y Juárez García, J. M. (2017). Evaluación del comportamiento electroquímico del extracto de nopal (*Opuntia Ficus-Indica*) como posible inhibidor de corrosión. *Revista de Metalurgia*, 53(4). <https://doi.org/10.3989/revmetalm.108>

- Marlianto, E., y Ramadhani, R. (2020). Efficiency of Ketapang (*Terminalia catappa* L.) Leaves Tannin Extract as Organic Inhibitor Against Corrosion Rate of Iron Metal in Seawater. *Journal of Technomaterials Physics. Bioteknologi*, 2(1), 63–69. <https://doi.org/10.32734/jotpv2i1.5268>
- Mayanglambam, R. S., Sharma, V., y Singh, G. (2011). *Musa paradisiaca* extract as a green inhibitor for corrosion of mild steel in 0.5 M sulphuric acid solution. *Portugaliae Electrochimica Acta*, 29(6), 405–417. <https://doi.org/10.4152/pea.201106405>
- Mohammed, M. T., Al-Sieadi, W. N., y Al-jeilawi, O. H. R. (2022). Corrosion inhibitor of carbon steel in 3.5% NaCl solution with Schiff base compounds. *International Journal of Health Sciences*, 6(6), 57–75. <https://doi.org/10.53730/ijhs.v6ns6.9172>
- Muliyastri, D., Septiyani, D. E., Afif, N., Sirenden, V. T., y Suprihartini, J. N. R. (2021). Application of Organic Inhibitors to the Corrosion of Materials AISI 1070 Steel. *Current Journal: International Journal Applied Technology Research*, 2(1), 12–20. <https://doi.org/10.35313/ijatr.v2i1.39>
- Muthukumarasamy, K., Pitchai, S., Devarayan, K., y Nallathambi, L. (2022). Thunbergia Fragrans extract as green inhibitor for mild steel in acidic medium. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, 11(2), 686–694. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2022-11-2-16>
- Na Chongzheng, (2020). Size-Controlled Capacity and Isocapacity Concentration in Freundlich Adsorption. *ACS Omega*, 5(22), 13130–13135. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c01144>
- Nikpour, S., Ramezanzadeh, M., Bahlakeh, G., Ramezanzadeh, B., y Mahdavian, M. (2019). Eriobotrya japonica Lindl leaves extract application for effective corrosion mitigation of mild steel in HCl solution: Experimental and computational studies. *Construction and Building Materials*, 220, 161–176. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.005>
- Obregon, J., Ebert, W. L., Kumar Gattu, V., KGattu, V., Obregon, J., Ebert, W., y Indacochea, J. (2023). Effects of Open Circuit Immersion Time and Vertex Potential on Cyclic Potentiodynamic Polarization Scans of Two Metallic Biomaterials. *Research square*, 8(18) 23. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2939580/v1>
- Odewunmi, N. A., Umoren, S. A., Gasem, Z. M., Ganiyu, S. A., y Muhammad, Q. (2015). L-Citrulline: An active corrosion inhibitor component of watermelon rind extract for mild steel

- in HCl medium. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 51, 177–185. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2015.01.012>
- Ogunleye, O. O., Arinkoola, A. O., Eletta, O. A., Agbede, O. O., Osho, Y. A., Morakinyo, A. F., y Hamed, J. O. (2020a). Green corrosion inhibition and adsorption characteristics of *Luffa cylindrica* leaf extract on mild steel in hydrochloric acid environment. *Heliyon*, 6(1), e03205. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03205>
- Ogwo, K. D., Nnanna, L. A., Onyeije, U. C., y Asiegbu, A. D. (2023). Electrochemical investigation of the anti-corrosive effect of spondias mombin leaves extract on the corrosion of aluminium alloy (AA2024) and mild steel in 0.5 M NaCl. *Chemical Science International Journal*, 32(3), 44–51. <https://doi.org/10.9734/csji/2023/v32i3847>
- Oloketuyi, S. F., y Khan, F. (2017). Inhibition strategies of *Listeria monocytogenes* biofilms—current knowledge and future outlooks. In *Journal of Basic Microbiology*, 57(9), 728–743. <https://doi.org/10.1002/jobm.201700071>
- Osaribie, N., Duduna, y W., Tombiri, M., (2019). Comparative study of the corrosion inhibition and adsorption of ripe and unripe plantain (*Musa paradisiaca*) peel extract on zinc in 2.0M CH₃COOH acid solution. *International journal of advances in scientific research and engineering*, 5(7), 78–85. <https://doi.org/10.31695/ijasre.2019.33404>
- Ortega-Ramírez, A. T., Barrantes-Sandoval, L. V., Casallas-Martin, B. D., y Cortés-Salazar, N. (2021). Application of green inhibitors for corrosion control in metals. *Review. DYNA (Colombia)*, 88(217), 160–168. <https://doi.org/10.15446/dyna.v88n217.93871>
- Othman, N. K., Yahya, S., y Ismail, M. C. (2019). Corrosion inhibition of steel in 3.5% NaCl by rice straw extract. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 70, 299–310. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2018.10.030>
- Oyewole, O., Oshin, T. A., y Atotuoma, B. O. (2021). *Corchorus olitorius* stem as corrosion inhibitor on mild steel in sulphuric acid. *Heliyon*, 7(4). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06840>
- Palaniappan, N., Cole, I., Caballero-Briones, F., Manickam, S., Justin Thomas, K. R., y Santos, D. (2020). Experimental and DFT studies on the ultrasonic energy-assisted extraction of the phytochemicals of: *Catharanthus roseus* as green corrosion inhibitors for mild steel in NaCl medium. *RSC Advances*, 10(9), 5399–5411. <https://doi.org/10.1039/c9ra08971c>

- Pavlidou, M., Pagitsas, M., y Sazou, D. (2015). Potential oscillations induced by the local breakdown of passive iron in sulfuric acid media. An evaluation of the inhibiting effect of nitrates on iron corrosion. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 19(11), 3207–3217. <https://doi.org/10.1007/s10008-015-2812-0>
- Policarpi, E. de B., y Spinelli, A. (2020a). Application of *Hymenaea stigonocarpa* fruit shell extract as eco-friendly corrosion inhibitor for steel in sulfuric acid. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 116, 215–222. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2020.10.024>
- Prabakaran, M., Kim, S. H., Hemapriya, V., y Chung, I. M. (2016a). *Tragia plukenetii* extract as an eco-friendly inhibitor for mild steel corrosion in HCl 1 M acidic medium. *Research on Chemical Intermediates*, 42(4), 3703–3719. <https://doi.org/10.1007/s11164-015-2240-x>
- Prabakaran, M., Kim, S. H., Oh, Y. T., Raj, V., y Chung, I. M. (2017). Anticorrosion properties of momilactone A isolated from rice hulls. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 45, 380–386. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2016.10.006>
- Prabhu, P. R., Hiremath, P., Prabhu, D., Gowrishankar, M. C., y Gurumurthy, B. M. (2021). Chemical, electrochemical, thermodynamic and adsorption study of EN8 dual-phase steel with ferrite-martensite structure in 0.5 M H₂SO₄ using pectin as inhibitor. *Chemical Papers*, 75(11), 6083–6099. <https://doi.org/10.1007/s11696-021-01773-x>
- Pradityana, A., Sulistijono, Shahab, A., Noerochim, L., y Susanti, D. (2016). Inhibition of Corrosion of Carbon Steel in 3.5% NaCl Solution by *Myrmecodia Pendans* Extract. *International Journal of Corrosion*, 6058286. <https://doi.org/10.1155/2016/6058286>
- Pramudita, M., Sukirno, S., y Nasikin, M. (2019). Synergistic corrosion inhibition effect of rice husk extract and KI for Mild steel in H₂SO₄ Solution. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering y amp; Amp; Catalysis*, 14(3), 697–704. <https://doi.org/10.9767/bcrec.14.3.4249.697-704>
- Qihui, W., Ruozhou, W., Qi, Z., Chongkang, Z., Xing, Z., Huahao, Zheng., Rui, Z., Yi, S., y Zhitao, Yan. (2023). Application of Biomass Corrosion Inhibitors in Metal Corrosion Control: A Review. *Journal Molecules*, 28(2832), 1-21. <https://doi.org/10.3390/molecules28062832>
- Rahal, C., Masmoudi, M., Abdelhedi, R., Sabot, R., Jeannin, M., Bouaziz, M., y Refait, P. (2016). Olive leaf extract as natural corrosion inhibitor for pure copper in 0.5 M NaCl solution: A

- study by voltammetry around OCP. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 769, 53–61. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2016.03.010>
- Rita, W. S., Swantara, I. M. D., Asih, I. A. R. A., y Damayanti, N. L. Y. (2023). Antibacterial efficacy of susu banana (*Musa paradisiaca* L.) peel methanol extract and the total contents of flavonoid and phenolic compounds. *Earth and environmental science*, 1177(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1177/1/012050>
- Rodríguez-Torres, A., Valladares-Cisneros, M. G., Salinas-Bravo, V. M., y Gonzalez-Rodriguez, J. G. (2017). Acid corrosion inhibition of 1018 carbon steel by using mentha spicata. *International Journal of Electrochemical Science*, 12(6), 5756–5771. <https://doi.org/10.20964/2017.06.20>
- Rosalbino, F., y Scavino, G. (2015a). Corrosion inhibition of high strength maraging steel by cerium(III) ions in sulfuric acid solution. *Materials and Corrosion*, 66(11), 1263–1268. <https://doi.org/10.1002/maco.201508378>
- Rosliza, R., y Nurashimah, A. (2021). The effectiveness of *Musa paradisiaca* as green inhibitor for mild steel in marine corrosion. *Journal of Physics*, 1874(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1874/1/012073>
- Rossella Sesia, Silvia Spriano, Marco Sangermano, Sara Ferraris (2023). Natural polyphenols and the corrosion protection of steel: recent advances and future perspectives for green and promising strategies. *Metals Journal*, 13(16), 1-27. <https://doi.org/10.3390/met13061070>
- Sabaa, H. M., El-Khatib, K. M., El-Kady, M. Y., y Mahmoud, S. A. (2022). Spinel structure of activated carbon supported MFe₂O₄ composites as an economic and efficient electrocatalyst for oxygen reduction reaction in neutral media. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 26(12), 2749–2763. <https://doi.org/10.1007/s10008-022-05269-w>
- Salazar Jimenez, J. A. (2015). Introduction to Corrosion Phenomena: Types, Influencing Factors and Control for Material's Protection. *Tecnologia En Marcha*, 28(3), 127–136. <https://doi.org/10.18845/tm.v28i3.2417>
- Saraswat, V., y Yadav, M. (2020). Carbon Dots as Green Corrosion Inhibitor for Mild Steel in HCl Solution. *ChemistrySelect*, 5(25), 7347–7357. <https://doi.org/10.1002/slct.202000625>

- Saxena, A., Prasad, D., Thakur, K. K., y Kaur, J. (2021). PDP, EIS, and surface studies of the low-carbon steel by the extract of tinospora cordifolia: a green approach to the corrosion inhibition. *Arabian journal for science and engineering*, 46(1), 425–436. <https://doi.org/10.1007/s13369-020-04894-9>
- Schmitzhaus, T. E., Ortega Vega, M. R., Schroeder, R., Muller, I. L., Mattedi, S., y Malfatti, C. de F. (2020). N-methyl-2-hydroxyethylammonium oleate ionic liquid performance as corrosion inhibitor for mild steel in hydrochloric acid medium. *Materials and Corrosion*, 71(11), 1885–1902. <https://doi.org/10.1002/maco.202011709>
- Shabani Nooshabadi, y M.S. Ghandchi. (2015). Santolina chamaecyparissus extract as a natural source inhibitor for 304 stainless steel corrosion in 3.5% NaCl. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 35, 231–237. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2015.06.028>.
- Sharma, S., Ganjoo. R., Thakur, A., y Kumar, A. (2022). Electrochemical characterization and surface morphology techniques for corrosion inhibition—a review. *Chemical Engineering Communications*, 210 (03), 412–447. <https://doi.org/10.1080/00986445.2022.2039913>
- Shwetha, KM., Praveev, BM., y Brarath K. (2024). A review on corrosion inhibitors: Types, mechanisms, electrochemical analysis, corrosion rate and efficiency of corrosion inhibitors on mild steel in an acidic environment. *Results in surfaces and interfaces*, 16 (1). <https://doi.org/10.1016/j.rsufi.2024.100258>
- Simescu-Lazar, F., Slaoui, S., Essahli, M., Bohr, F., Lamiri, A., Vanoye, L., y Chopart, J. P. (2023). Thymus satureoides oil as green corrosion inhibitor for 316l stainless steel in 3% NaCl: Experimental and theoretical studies. *Lubricants*, 11(2). <https://doi.org/10.3390/lubricants11020056>
- Sowa, M., y Simka, W. (2018). Electrochemical impedance and polarization corrosion studies of tantalum surface modified by DC Plasma electrolytic oxidation. *Materials*, 11(4). <https://doi.org/10.3390/ma11040545>
- Srivastava, M., Srivastava, S. K., Nikhil, Ji, G., y Prakash, R. (2019). Chitosan based new nanocomposites for corrosion protection of mild steel in aggressive chloride media. *International Journal of Biological Macromolecules*, 140, 177–187. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.08.073>

- Tamalmani, K., y Husin, H. (2020). Review on corrosion inhibitors for oil and gas corrosion. *Applied Sciences*, 10(10). <https://doi.org/10.3390/APP10103389>
- Thabo, P., Lukman O, O., Indra, B., y Abolani S, A. (2015). adsorption and corrosion inhibition studies of some selected dyes as corrosion inhibitors for mild steel in acidic medium: gravimetric, electrochemical, quantum chemical studies and synergistic effect with iodide ions. *Molecular Diversity*, 20(9), 16004–16029. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/molecules200916004>
- Tian, W., Du, N., Li, S., Chen, S., y Wu, Q. (2014). Metastable pitting corrosion of 304 stainless steel in 3.5% NaCl solution. *Corrosion Science*, 85, 372–379. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.04.033>
- Toghan, A., Alduaij, O. K., Fawzy, A., Mostafa, A. M., Eldesoky, A. M., y Farag, A. A. (2024). Effect of adsorption and interactions of new triazole-thione-schiff bases on the corrosion rate of carbon steel in 1 M HCl solution: Theoretical and experimental evaluation. *ACS Omega*, 9(6), 6761–6772. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c08127>
- Torres-Hernández, J., DelAngel-Meraz; Corvo-Perez E.F. (2023). Tradescantia spathacea: New green corrosion inhibitor for SAE 1010 steel in acid médium. *Int. J. Corros. Scale Inhib.* 12(1), 61-83. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2023-12-1-4>
- Torres-Hernández, J., DelAngel-Meraz; Corvo-Perez E.F. Rivera-Ruedas M.G., Hernández-Rivera, M.A., Barajas-Fernández, J. (2023). *Musa paradisiaca* extract as a corrosion inhibitor of steel. Role of KI as a synergistic additive. *Int. J. Corros. Scale Inhib.* 12(4), 2391-2418. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2023-12-4-50>
- Umoren, S. A., Eduok, U. M., Solomon, M. M., y Udoh, A. P. (2016). Corrosion inhibition by leaves and stem extracts of *Sida acuta* for mild steel in 1 M H₂SO₄ solutions investigated by chemical and spectroscopic techniques. *Arabian Journal of Chemistry*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2011.03.008>
- Unnimaya, Shetty, P., Kumari, P., y Kagatkar, S. (2022). Glutathione as green corrosion inhibitor for 6061Al-SiC(p) composite in HCl medium: electrochemical and theoretical investigation. *Journal of solid state electrochemistry*, 022-05315-7 <https://doi.org/10.1007/s10008>

- Verma, C., Ebenso, E. E., y Quraishi, M. A. (2017). Corrosion inhibitors for ferrous and non-ferrous metals and alloys in ionic sodium chloride solutions: A review. In *Journal of Molecular Liquids*, 248, 927–942. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.10.094>
- Verma, C., Quraishi, M. A., y Ebenso, E. E. (2018). Microwave and ultrasound irradiations for the synthesis of environmentally sustainable corrosion inhibitors: An overview. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 10, 134–147. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2018.11.001>
- Verma, C., Verma, D. K., Ebenso, E. E., y Quraishi, M. A. (2018). Sulfur and phosphorus heteroatom-containing compounds as corrosion inhibitors: An overview. *Heteroatom Chemistry*, 24(4). Wiley-Blackwell. <https://doi.org/10.1002/hc.21437>
- Vorobyova, V., y Skiba, M. (2020). Apricot pomace extract as a natural corrosion inhibitor of mild steel corrosion in 0.5 M NaCl solution: a combined experimental and theoretical approach. In *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 50(4) 456-462. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.292>
- Wei, H., Heidarshenas, B., Zhou, L., Hussain, G., Li, Q., y Ostrikov, K. (Ken). (2020). Green inhibitors for steel corrosion in acidic environment: state of art. In *Materials Today Sustainability*, 10. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2020.100044>
- Xhanari, K., y Finsgar, M. (2019b). Organic corrosion inhibitors for aluminum and its alloys in chloride and alkaline solutions: A review. In *Arabian Journal of Chemistry*, 12,(8), 4646–4663. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2016.08.009>
- Zakeri, A., Bahmani, E., y Aghdam, A. S. R. (2022). Plant extracts as sustainable and green corrosion inhibitors for protection of ferrous metals in corrosive media: A mini review. *Corrosion Communications*, 5, 25–38. <https://doi.org/10.1016/j.corcom.2022.03.002>
- Zamani, A., Eavani, S., y Rafiee, E. (2021). An environmentally friendly yellow composite pigment: leaching stability and corrosion inhibition properties. *ChemistrySelect*, 6(16), 3833–3840. <https://doi.org/10.1002/slct.202004696>
- Zhang, M. (2021). Davidian involucre Leaves Extract as Green Corrosion Inhibitor for low carbon Steel in concrete pore solution containing chloride ions. *International Journal of Electrochemical Science*, 16, 1–9. <https://doi.org/10.20964/2021.04.01>

- Zhao, R., Yu, Q., y Niu, L. (2022). Corrosion inhibition of amino acids for 316L stainless steel and synergistic effect of I⁻ ions: Experimental and theoretical studies. *Materials and Corrosion*, 73(1), 31–44. <https://doi.org/10.1002/maco.202112511>
- Zhu, X., y Zi, G. (2017a). A 2D mechano-chemical model for the simulation of reinforcement corrosion and concrete damage. *Construction and Building Materials*, 137, 330–344. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.103>
- Zhu, X., y Zi, G. (2017b). A 2D mechano-chemical model for the simulation of reinforcement corrosion and concrete damage. *Construction and Building Materials*, 137, 330–344. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.103>
- Zouitini, A., Kandri Rodi, Y., Elmselem, H., Ouazzani Chahdi, F., Steli, H., Ad, C., Ouzidan, Y., Essassi, E. M., Chetouani, A., y Hammouti, B. (2018). Moroccan Journal of Chemistry Corrosion Inhibition Behavior of Quinoxaline Derivative as a Green Corrosion Inhibitor for Mild Steel in Hydrochloric Acid: Electrochemical, Weight Loss and DFT Simulations Studies. In *J. Chem*, 6. <http://revues.imist.ma/?journal=morjchemypage=login>

ANEXO 1. Artículos Publicados

Int. J. Corros. Scale Inhib., 2023, 12, no. 1, 61–63

61

Tradescantia spathacea: New green corrosion inhibitor for SAE 1010 steel in acid medium

J.R. Torres Hernández,¹ E. Del Angel Meraz¹
and E.F. Corvo Perez²

¹Juárez Autonomous University of Tabasco, Postgraduate in Engineering Sciences, Carretera Cunduacán-Jalpa Km. 1, Col. La Esmeralda, c.p. 86690, Cunduacán, Tabasco, México

²Autonomous University of Campeche, Corrosion Research Center, Corrosion Research Center, Av. Agustín Melgar S/N entre calle 20 y Juan de la Barrera, Col Buenavista, c.p. 24039, Campeche, México

*E-mail: ebelia.delangel@ujat.mx

Abstract

Tradescantia spathacea extract (TSE) is a new green corrosion inhibitor of SAE 1010 steel in 1 M HCl. GC-MS, UV-VIS and FTIR analysis of the extract showed the presence of phenols and other heterocyclic compounds including the presence of O, N and S in the molecules, aromatic rings and different functional groups associated with inhibitory properties. Inhibitory efficiency was evaluated by Weight Loss, Tafel extrapolation and EIS. The range of maximum efficiencies was 91.31–95.16%, all determined at concentration 1200 ppm. They increase with immersion time. Tafel results indicate that it is a mixed-type inhibitor. Several adsorption models of Langmuir, Temkin and Freundlich were tested. The best fit corresponded to Langmuir. It means an adsorbed monolayer is formed without interactions between molecules. Electrochemical reactions different to those involved in corrosion may occur due to the presence of compounds in the extract that can be oxidized or reduced. That is the case of polyphenols oxidation already reported for *Tradescantia Spathacea* extracts. It is suggested to use non electrochemical methods like Weight Loss to confirm the efficiency of the inhibitor.

Received: July 26, 2022. Published: January 8, 2023

doi: [10.17675/2305-6894-2023-12-14](https://doi.org/10.17675/2305-6894-2023-12-14)

Keywords: acid medium, green corrosion inhibitor, steel, *Tradescantia spathacea*.

1. Introduction

The corrosive environment in industrial processes is the main cause of corrosion losses [1]. Carbon steel is the most common metal used in industries due to availability, cost and mechanical properties; however, it is highly sensitive to corrosion in acid media (HCl, H₂SO₄) [2–5]. Industrial processes efficiency decreases and production may be appreciably affected when corrosion occurs. Accidents like fires, explosions and release of toxic products into the atmosphere, water or land may occur due to corrosion. To prevent internal corrosion in process equipment, pipes, storage tanks exposed to acid media, the most effective method

Int. J. Corros. Scale Inhib., 2023, 12, no. 4, 2391–2418

2391

Musa paradisiaca extract as a corrosion inhibitor of steel. Role of KI as a synergistic additive

J.R. Torres-Hernandez,¹ E. Del Ángel-Meraz,¹* F.E Corvo-Pérez,²
M.G. Rivera-Ruedas,¹ M.A. Hernández-Rivera¹
and J. Barajas-Fernández²

¹Juarez Autonomous University of Tabasco, Postgraduate in Engineering Sciences, Carretera Cunduacan-Jalpa Km. 1, Col. La Esmeralda, c.p. 86690, Cunduacan, Tabasco, México

²Autonomous University of Campeche, Corrosion Research Center, Corrosion Research Center, Av. Agustín Melgar S/N, street 20 between and Juan the Barrera, Col Buenavista, c.p. 24039, Campeche, México

*E-mail: bellita.delangel@gmail.com

Abstract

The synergistic effect of KI addition to the system *Musa paradisiaca* shell (ECMP–KI extract) with ethanol/water on SAE 1010 carbon steel in 1 M HCl solution was studied. *Musa paradisiaca* (ECMP extract), was obtained by Soxhlet extraction with ethanol/water and characterized by gas chromatography (GC-MS). The following main components were found: C₁₈H₃₆O (octadecane), C₁₆H₃₂O₂ (palmitic acid) and C₆H₆O (phenol). The weight loss (WL) shows a maximum efficiency of 91% with ECMP extract and 93% with ECMP–KI extract. Electrochemical impedance (EIS) and potentiodynamic polarization (PDP) tests were performed at three immersion times: *t*₁: 1 h, *t*₂: 24 h, and *t*₃: 48 h. The obtained efficiencies by EIS with ECMP extract were in the range 75–93% and 80–94% for the system ECMP–KI. The addition of KI showed a slight increase in efficiency, but higher than under WL evaluation. Respecting PDP technique, it was possible to identify ECMP extract as a mixed type inhibitor for the three immersion times, obtaining efficiencies of 76–91% with ECMP extract and 78–93% for ECMP–KI extract. Data obtained from the EIS and PDP electrochemical techniques were fitted to Langmuir, Temkin and Freundlich adsorption isotherm models. It was observed that the Langmuir model showed the best fit for the ECMP extract and for ECMP–KI extract. Only a slight effect of KI as a synergistic additive was observed, possibly because the extract shows high inhibitory efficiency, and the surface was already saturated with the adsorbed natural inhibitor.

Received: July 31, 2023. Published: December 15, 2023

doi: [10.17675/2305-6894-2023-12-4-50](https://doi.org/10.17675/2305-6894-2023-12-4-50)

Keywords: carbon steel, green inhibitor, *Musa paradisiaca*, synergistic additive.

1. Introduction

Corrosion of steel and other metals commonly causes economic losses in the process industry due to equipment failures. Steel is the most commonly used material for the

ANEXO 2. Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Institucional

Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Institucional	
Título de Tesis	Desarrollo de inhibidores elaborados con extractos de plantas y aditivos sinérgicos para el control de la corrosión del acero en medios ácidos y alcalinos
Autor(a) o autores(ras) de la Tesis:	M.C. Jazmín del Rosario Torres Hernández Dra. Ebelia del Ángel Meraz Dr. Francisco Eduardo Corvo Pérez
ORCID:	0000-0002-2741-8525 0000-0002-6567-4263 0000-0001-7042-7382
Resumen de la Tesis	<p>En éste trabajo se investigó el comportamiento de dos extractos naturales como inhibidores de corrosión: a partir del extracto de la cáscara de <i>Musa paradisiaca</i> (ECMP) y el extracto de la hoja de <i>Tradescantia spathacea</i> (EHTS), es importante mencionar que este último no se encontraron investigaciones reportadas en la literatura científica, siendo esta investigación el aporte. La obtención de los extractos se realizó por el método Soxhlet en solución de etanol/agua. Los extractos fueron caracterizados por Cromatografía de Gases y por UV-Vis. Para la caracterización electroquímica se utilizó acero al carbón (SAE 1010) en medio ácido y medio alcalino, utilizando técnicas de impedancia electroquímica, polarización potenciodinámica y el método gravimétrico de pérdida de peso. Con la técnica de impedancia electroquímica se encontraron eficiencias del 95 % (EHTS) y 93 % (ECMP) en medio ácido, para polarización potenciodinámica se reportaron eficiencias del 91 % (ECMP, EHTS) en medio ácido. Con la técnica gravimétrica de pérdida</p>

	<p>de peso, se obtuvieron eficiencias del 83 % (ECMP) y del 91 % (EHTS) en medio alcalino. Se utilizó KI como aditivo sinérgico con el extracto de EHTS, se observó un incremento del 2 % en la eficiencia. Los dos inhibidores (EHTS y ECMP) en medio ácido se adsorben, de acuerdo una isoterma de Langmuir. De acuerdo a la norma NRF 005-PEMEX-2000, el criterio de aceptación para las pruebas electroquímicas y gravimétricas es del 90 % de eficiencia, siendo que para los inhibidores del EHTS y ECMP de éste trabajo cumplen con el criterio, para su aplicación industria</p>
Palabras claves de la Tesis:	<p>Acero al carbón, KI, <i>Musa paradisiaca</i>, Técnicas electroquímicas, <i>Tradescantia spathacea</i>.</p>
Referencias citadas:	<p>Las referencias citadas se encuentran en las páginas 100-115.</p>

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.