

EFECTO ELECTROQUÍMICO DEL INHIBIDOR NATURAL EN ACERO API N80 Q

Evaluación electroquímica del efecto de un extracto de biomasa residual de caña panelera como inhibidor de corrosión en acero API N80 Q expuesto a atmósferas de CO₂

Andrea Paola Neira Valdes y Natalia Rosa Borrero Zambrano

Trabajo de grado para obtener el título de Ingeniero Químico

Modalidad trabajo de investigación

Director

Darío Yesid Peña Ballesteros

PhD en Corrosión

Codirector

Juan Carlos Orozco Agamez

PhD(c) en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2025

Dedicatorias

A Dios, por ser mi guía, por regalarme la sabiduría y el discernimiento necesario para alcanzar mis objetivos.

A mi madre, Ana Merlidez, por su amor incondicional y sacrificio. Tu ejemplo de fortaleza y dedicación ha sido mi inspiración y motivación para seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles. Gracias por creer en mí y enseñarme a nunca rendirme.

A mis hermanas, Laura, Estefany, Maira y Nani, por su apoyo incondicional y amor constante; Por celebrar mis logros y alentarme en momentos difíciles. Su presencia en mi vida ha sido un regalo invaluable.

A una personita muy especial que ahora me cuida desde el cielo, mi Nochy: sé que siempre me acompañas, y estoy segura de que te sientes orgullosa de este logro. Tu amor y tu recuerdo me han acompañado en cada paso del camino.

A mí misma, por la perseverancia y determinación que me han llevado a alcanzar este logro. Recuerda que cada obstáculo es una oportunidad para crecer y cada logro es un paso hacia tus sueños. Sigue adelante con confianza y fe en ti misma.

Natalia Rosa Borrero Zambrano

Dedicatorias

A mis padres, Julián Neira Quitian y Martha Helena Valdes, porque no hay palabras suficientes para agradecer todo lo que han hecho por mí, Gracias por sus sacrificios, por su amor inmenso y por haber creído en mí incluso cuando yo dudaba. Gracias por enseñarme a ser fuerte, a nunca rendirme, por darme las alas con las que hoy puedo alcanzar este sueño. Todo lo que soy y todo lo que he logrado es reflejo de su entrega, su ejemplo y su infinito amor.

A mis hermanos, Mauricio, Andrés, Albeiro y Yulian, por su apoyo constante, por celebrar mis logros y animarme en momentos difíciles. Gracias por ser parte esencial en este camino con su cariño y compañía.

A mis suegros, Abel y Gloria, por acogerme con afecto, por sus palabras de aliento y por estar presentes en los momentos más importantes de esta etapa.

A Silvia, mi amiga y compañera de carrera desde el primer semestre. Gracias por tu amistad sincera, por estar siempre con una palabra de apoyo, por tu ayuda desinteresada y por ser una presencia constante y especial en cada etapa de este camino. Tu compañía hizo de esta travesía una experiencia más llevadera y significativa.

Y a mi pareja, Andersson Reyes, por caminar a mi lado con amor, paciencia y compromiso. Gracias por sostenerme en los días más duros, por compartir mis sueños como tuyos y por estar siempre ahí, firme y presente, celebrando cada paso conmigo.

A todos ustedes, gracias por ser parte esencial de mi historia. Esta meta es tan mía como suya.

Andrea Paola Neira Valdes

Agradecimientos

Quiero expresar mis más sinceros agradecimientos al grupo de investigación en corrosión (GIC), sede Guatiguará, por abrirnos las puertas de su laboratorio y brindarnos el espacio necesario para el desarrollo experimental de esta tesis.

Agradezco al M.Sc. Andrey Caballero y al M.Sc. Yeison Lozano, por su acompañamiento. Su experiencia y conocimiento compartido fueron fundamentales en esta etapa.

Agradecimiento especial al director de tesis, Darío Yesid Peña y codirector Juan Carlos, por su orientación y consejos, los cuales fueron importantes para el éxito de esta investigación.

Al programa de Investigación para el Desarrollo de Productos con Valor Agregado a partir del Uso Eficiente de Biomasa Residual de Caña Panelera Proveniente del Departamento de Santander, por permitirme ser parte de esta iniciativa, que fortalece la investigación con propósito en nuestra región.

También quiero agradecer a mi amiga Valeria, por su generosidad al compartir sus conocimientos y por su valiosa amistad a lo largo de este proceso.

Finalmente, a mi compañera Andrea Neira, por su perseverancia, dedicación y paciencia durante este proceso. Su compañía y apoyo fueron fundamentales para mí.

Natalia Rosa Borrero Zambrano

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco profundamente a Dios, por ser mi guía y fortaleza a lo largo de este camino. Por darme la sabiduría, la paciencia y la perseverancia necesaria para culminar esta etapa tan importante en mi vida.

A mis directores de proyecto de grado, gracias por su dedicación, orientación y por confiar en nuestras capacidades. Su acompañamiento fue fundamental para el desarrollo de este trabajo.

Al Grupo de Investigación en Corrosión (GIC) de la sede Guatiguará, por abrirnos las puertas y brindarnos el respaldo técnico, académico y humano para llevar a cabo este proyecto.

Al M.Sc. Andrey Caballero y al M.Sc. Yeison Lozano, por su invaluable apoyo en el laboratorio, por compartir generosamente su conocimiento y por guiarnos con paciencia y compromiso en cada parte del proceso experimental.

Al programa de Investigación para el Desarrollo de Productos con Valor Agregado a partir del Uso Eficiente de Biomasa Residual de Caña Panelera Proveniente del Departamento de Santander, por permitirnos hacer parte de una iniciativa tan significativa, que fortalece la investigación con propósito en nuestra región.

Y finalmente, a mi compañera de trabajo, Natalia Borrero, por su compromiso, entrega y por compartir conmigo esta experiencia de crecimiento académico y personal. Gracias por caminar a mi lado durante todo este proceso.

Andrea Paola Neira Valdes

EFECTO ELECTROQUÍMICO DEL INHIBIDOR NATURAL EN ACERO API N80 Q

Tabla de contenido

Introducción.....	13
1. Objetivos	16
1.1. Objetivo general	16
1.2. Objetivos específicos	16
2. Estado del Arte.....	17
3. Metodología.....	21
3.1. Fase 1: Revisión bibliográfica.....	21
3.2. Fase 2: Obtención del extracto	22
3.3. Fase 3: Determinación de la velocidad de corrosión	23
3.3.2 Preparación de la muestra.....	23
3.3.3 Montaje celda electroquímica.....	24
3.3.4 Cálculo de la velocidad de corrosión	25
3.4. Fase 4: Cálculo de la eficiencia	27
3.4.1 Condiciones de operación:.....	27
3.4.2 Eficiencia del inhibidor	27
3.5. Fase 5: Análisis morfológico y composicionales	28
3.5.1 Análisis superficial del acero al carbono a partir de microscopia electrónica de barrido (SEM).....	28
3.5.2 Análisis de los cambios observados antes y después de la aplicación del inhibidor mediante EDS	28
3.5.3. Evaluación del consumo energético e impactos ambientales	29
4. Resultados.....	30
4.1. Análisis electroquímico de la velocidad de corrosión del acero API N80Q a diferentes concentraciones de inhibidor.....	30
4.1.1. Graficas de potencial de circuito abierto (OCP), Resistencia a la polarización y curvas potencio dinámicas.....	30
4.2. Cálculo de la eficiencia	36
4.3. Microscopia electrónica de barrido (SEM-EDS)	36
4.4 Evaluación del consumo energético e impactos ambientales.....	40
5. Conclusiones.....	43
6. Recomendaciones	45
Referencias bibliográficas	46
Apéndices	55

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Eficiencias reportadas en la literatura de compuestos con propiedades anticorrosivas bajo diferentes condiciones</i>	19
Tabla 2 <i>Parámetros de las pendientes Tafel y las velocidades de corrosión del acero a diferentes concentraciones de inhibidor y a 25C</i>	35
Tabla 3 <i>Eficiencias de inhibición en la protección del acero API N80 Q a distintas concentraciones de inhibidor</i>	36
Tabla 4 <i>Caracterización elemental determinada por EDS en un punto de la superficie del acero sin inhibidor</i>	37
Tabla 5 <i>Composición elemental determinada por EDS en un punto de la superficie del acero 200 ppm inhibidor</i>	39
Tabla 6 <i>Caracterización elemental determinada por EDS en un punto de la superficie del acero 500 ppm inhibidor</i>	40
Tabla 7 <i>Parámetros utilizados en el OpenLCA</i>	41
Tabla 8 <i>Composición química del acero API N80Q</i>	55
Tabla 9 <i>Valores de constantes para su uso en la ecuación de Faraday</i>	61

Lista de Figuras

Figura 1 Metodología para la obtención del extracto y evaluación de su efectividad.....	21
Figura 2 <i>Extracto de la caña panelera por medio de un equipo Soxhlet</i>	22
Figura 3 <i>Separación liquido-solvente del extracto en un rotoevaporador</i>	23
Figura 4 <i>Dimensiones del cupón acero API N80Q</i>	24
Figura 5 <i>Montaje celda electroquímica</i>	25
Figura 6 <i>Gráfica que representa los datos de la ecuación Tafel</i>	26
Figura 7 <i>Gráfica de potencial de circuito abierto (OCP), durante 20 minutos hasta alcanzar el equilibrio ($\pm 5 \mu\text{m}$ $5 \pm 5 \text{ mV}$) para diferentes concentraciones de la solución (10 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 200 ppm, 500 ppm y blanco).</i>	31
Figura 8 <i>Gráfica de Resistencia a la polarización, durante 20 minutos hasta alcanzar el equilibrio ($\pm 5 \mu\text{m}$ $5 \pm 5 \text{ mV}$) para diferentes concentraciones de la solución (10 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 200 ppm, 500 ppm y blanco).</i>	32
Figura 9 <i>Gráfica de curvas potenciodinámicas, durante 20 minutos hasta alcanzar el equilibrio ($\pm 5 \mu\text{m}$ $5 \pm 5 \text{ mV}$) para diferentes concentraciones de la solución (10 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 200 ppm, 500 ppm y blanco).</i>	33
Figura 10 <i>Microscopia electrónica de barrido (SEM-EDS) de la muestra sin inhibidor de corrosión</i>	37
Figura 11 <i>Microscopia electrónica de barrido (SEM-EDS) de la muestra con 200ppm de inhibidor de corrosión</i>	38
Figura 12 <i>Microscopia electrónica de barrido (SEM-EDS) de la muestra con 500ppm de inhibidor de corrosión</i>	40
Figura 13 <i>Resultados evaluación del consumo energético e impactos ambiental mediante el software OpenLCA</i>	42
Figura 14 <i>Micrografía sin ataque a 100X del espécimen en SL</i>	56
Figura 15 <i>Micrografías a 500X y 1000X para la sección longitudinal, mostrando microestructura de martensita fina en listones</i>	56
Figura 16 <i>Micrografía a 500X y 1000X para la sección transversal, mostrando microestructura de martensita fina de listones</i>	57
Figura 17 <i>Proceso de extrapolación de Tafel mediante Origin para determinar parámetros electroquímicos en la curva potenciodinámica</i>	58

Lista de Apéndices

Apéndice A. Composición química del acero API N80Q.....	55
Apéndice B. Metalografía del N80Q.....	55
Apéndice C. Aplicación del método de extrapolación de Tafel en el software Origin	57
Apéndice D. Fundamentos teóricos y ecuaciones de las técnicas electroquímicas utilizadas como: Curva potenciodinámica, Tafel y resistencia a la polarización.	58

Glosario

Corrosión: Proceso de deterioro de materiales metálicos mediante reacciones químicas y electroquímicas. Ocurre a través de reacciones de oxidación-reducción, que requieren electrodos (ánodo y cátodo), un electrolito conductor y una conexión eléctrica entre los electrodos (Salazar Jiménez & José Alberto, 2015).

Curvas potenciodinámicas: Técnica electroquímica utilizada para determinar parámetros característicos de los electrodos en estudio, tales como como potencial de corrosión (E_{corr}), la densidad de corriente (i_{corr}) y la velocidad de corrosión (Soriano, 2022).

Electroquímica: Rama de la química que estudia la transformación entre energía eléctrica y la energía química, enfocándose en reacciones redox que ocurren en la interfaz entre conductores eléctricos e iónicos (Flower Paul & Theopold Klaus, 2023).

Inhibidor de corrosión: Son sustancias químicas, orgánicas o inorgánicas, que se agregan en pequeñas cantidades a un sistema para reducir o evitar la corrosión de los metales. Funcionan formando una película protectora sobre la superficie metálica, alterando las reacciones electroquímicas responsables de la corrosión, o modificando el entorno para ralentizar el proceso de corrosión (Gómez, 2016).

Técnicas electroquímicas: Métodos analíticos que utilizan la medición de potencial, corriente o carga para determinar la concentración de un analito o caracterizar su reactividad química, a través del estudio de reacciones redox en celdas electroquímicas (Gómez, 2016).

Resumen

Título: Evaluación electroquímica del efecto de un extracto de biomasa residual de caña panelera como inhibidor de corrosión en acero API N80 Q expuesto a atmosferas de CO₂*

Autor: Andrea Paola Neira Valdes y Natalia Rosa Borrero Zambrano.**

Palabras claves: Corrosión, inhibidor de corrosión, electroquímica, velocidad de corrosión.

Descripción: Debido a la problemática presentada en la industria del petróleo por la corrosión del acero API N80 Q en ambientes con atmosferas de CO₂, lo que conlleva significativas pérdidas económicas y riesgos operativos, en el presente trabajo de investigación, se evaluó, mediante técnicas electroquímicas, el efecto inhibitorio de un extracto de biomasa residual de caña panelera como una solución inhibitoria y sostenible para este desafío. Para esto, se realizaron ensayos de resistencia a la polarización, curvas potenciodinámicas y tafel utilizando una celda electroquímica conformada por 3 electrodos (electrodo de trabajo acero API N80 Q, contraelectrodo de platino y electrodo de referencia Ag/AgCl). Estas técnicas permitieron calcular tanto la velocidad de corrosión como la eficiencia del inhibidor a diferentes concentraciones (10 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 200 ppm y 500 ppm). El análisis electroquímico demostró que la concentración de 500 ppm presentó una velocidad de corrosión menor que las demás concentraciones y una eficiencia del 99.62%. Además, se realizaron análisis morfológicos y composicionales mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopia de energía dispersiva de rayos X (EDS), con el fin de evaluar los efectos del inhibidor de corrosión sobre el acero API N80 Q. El análisis superficial sugiere que la protección se debe principalmente a un mecanismo de adsorción física y a la formación de una película protectora, que actúa como barrera entre el metal y el ambiente corrosivo. En conjunto, los resultados obtenidos confirman que el extracto de biomasa residual de caña panelera, especialmente a una concentración de 500 ppm proporciona una protección altamente favorable sobre el acero API N80 Q.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Darío Yesid Peña Ballesteros, PhD. en corrosión. Codirector: Juan Carlos Orozco Agamez, MSc. en Ingeniería Química.

Abstract

Title: Electrochemical evaluation of the effect of an extract of residual biomass from sugarcane as a corrosion inhibitor in API N80 Q steel exposed to CO₂ atmospheres.*

Author: Andrea Paola Neira Valdes and Natalia Rosa Borrero Zambrano.**

Key Words: Corrosion, corrosion inhibitor, electrochemistry, corrosion rate.

Description: Due to the problem presented in the oil industry by the corrosion of API N80 Q steel in environments with CO₂ atmospheres, which leads to significant economic losses and operational risks, in this research work, the inhibitory effect of an extract of residual biomass from sugarcane as an inhibitory and sustainable solution to this challenge was evaluated by electrochemical techniques. For this purpose, polarization resistance tests, potentiodynamic and tafel curves were performed by using an electrochemical cell consisting of 3 electrodes (API N80 Q steel working electrode, platinum counter electrode and Ag/AgCl reference electrode). These techniques made it possible to calculate both the corrosion rate and the efficiency of the inhibitor at different concentrations (10 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 200 ppm and 500 ppm). The electrochemical analysis showed that the 500ppm concentration presented a lower corrosion rate than the other concentrations and an efficiency of 99.62%. In addition, morphological and compositional analyses were performed by scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS), in order to evaluate the effects of the corrosion inhibitor on API N80 Q steel. The surface analysis suggests that the protection is mainly due to a physical adsorption mechanism and the formation of a protective film, which acts as a barrier between the metal and the corrosive environment. Overall, the results obtained confirm that the panelera cane residual biomass extract, especially at a concentration of 500ppm provides highly favorable protection on API N80 Q steel.

* Bachelor Thesis

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director: Darío Yesid Peña Ballesteros, PhD. in corrosion. Co-director: Juan Carlos Orozco Agamez, MSc. in Chemical Engineering.

Introducción

El fenómeno de la corrosión es uno de los principales desafíos en la industria del petróleo y gas, especialmente en ambientes que contienen CO₂ (dióxido de carbono). Este problema se ha visto intensificado en los últimos años debido al creciente interés en el transporte y almacenamiento de CO₂ como parte de las estrategias de captura y almacenamiento de carbono para la mitigación del cambio climático (Shang & Zhu, 2021). El acero API N80 Q, utilizado con frecuencia en estas aplicaciones, es particularmente vulnerable a la corrosión cuando se expone a ambientes con presencia de CO₂, lo que puede comprometer la integridad de las instalaciones industriales y resultar en importantes pérdidas económicas (Suarez, 2018).

La disolución del CO₂ en el agua forma ácido carbónico que promueve procesos corrosivos agresivos en las superficies metálicas (Suarez, 2018). Si bien existen inhibidores de corrosión disponibles comercialmente para contrarrestar este efecto, en su mayoría son costosos y potencialmente peligrosos para el medio ambiente (Gomez, 2016). Este escenario ha impulsado la búsqueda de alternativas más ecológicas, más sostenibles y mucho más asequibles, donde los inhibidores de corrosión ecológicos derivados de extractos naturales han surgido como una opción prometedora (Gómez, 2016).

En este contexto, la valorización de residuos agroindustriales como los de biomasa de bagazo de caña de azúcar para la síntesis como inhibidores de corrosión ecológicos han generado gran expectativa proyectándose como una opción prometedora (Njoku et al., 2024). Para ser más específicos, el bagazo es un subproducto abundante de la industria de la caña de azúcar. Según los datos anuales de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), en 2021 se produjeron aproximadamente 1.900 millones de toneladas de caña de azúcar a

EFFECTO ELECTROQUÍMICO DEL INHIBIDOR NATURAL EN ACERO API N80 Q

nivel mundial, lo que generó alrededor de 354 millones de toneladas de bagazo como residuo (FAO, 2021). En Colombia, uno de los principales productores de panela en el mundo, se estima que por cada 23 millones de toneladas de caña generada se produce aproximadamente 6, 5 millones toneladas de bagazo residual, lo que sugiere una proporción de aproximadamente 0,28 toneladas de bagazo de caña por tonelada de caña procesada. (FAO, 2021). Este bagazo de caña tiene una composición típica que incluye celulosa (40-50%), hemicelulosa (25-35%) y lignina (18-24%) (Ungureanu et al., 2022). La presencia de estos compuestos, en particular la lignina y sus derivados fenólicos, hace del bagazo de caña de azúcar un candidato potencial para ser utilizado como fuente de inhibidor ecológico de la corrosión.

Estudios previos han demostrado la efectividad de varios extractos naturales como inhibidores de corrosión, Por ejemplo, el extracto de sandía ha demostrado una eficiencia de inhibición del 94% en acero estructural ASTM A36 (Rodríguez et al., 2020), mientras que los extractos de *Azadirachta indica* y tallo de piña han alcanzado eficiencias superiores al 99% (R. Holla et al., 2024). Sin embargo, existe una falta de conocimiento sobre el comportamiento de estos inhibidores naturales en condiciones saturadas de CO₂, en particular para el acero API N80 Q.

El presente trabajo de investigación busca evaluar el potencial del extracto de biomasa residual de caña panelera como inhibidor de corrosión para el acero API N80 Q en ambientes saturados con CO₂. Por lo anterior surge la siguiente pregunta de investigación: *¿Cuál es la eficiencia de inhibición que tiene el extracto de biomasa residual de caña panelera en el acero API N80 Q en un ambiente con presencia de CO₂?*

Los resultados de esta investigación contribuirán al desarrollo de soluciones sostenibles para la protección contra la corrosión en sistemas asociados al transporte y captura de CO₂

EFECTO ELECTROQUÍMICO DEL INHIBIDOR NATURAL EN ACERO API N80 Q

aprovechando recursos locales y reduciendo el impacto ambiental asociado a los inhibidores convencionales. Además, el estudio aportará conocimientos valiosos sobre el comportamiento de inhibidores verdes en ambientes de CO₂, un área de creciente importancia en el contexto de las tecnologías de captura y almacenamiento de carbono.

EFFECTO ELECTROQUÍMICO DEL INHIBIDOR NATURAL EN ACERO API N80 Q

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Evaluar electroquímicamente el efecto inhibitor de un extracto de biomasa residual de caña panelera en un acero API N80 Q expuesto a atmósferas de CO₂.

1.2. Objetivos específicos

- Determinar la velocidad de corrosión del acero API N80 Q a diferentes concentraciones mediante técnicas electroquímicas de resistencia a la polarización, Tafel y curvas potenciodinámicas.
- Calcular la eficiencia de inhibición de corrosión de un extracto de biomasa residual de caña panelera para establecer la concentración más adecuada de inhibidor.
- Analizar los cambios morfológicos y composicionales en el acero al carbono posterior a la aplicación del inhibidor, utilizando técnicas de Microscopia Electrónica de Barrido (SEM) y Energía Dispersiva de Rayos X (EDS).

2. Estado del Arte

La corrosión es un problema crítico en el transporte y captura de dióxido de carbono (CO₂), afectando las tuberías y equipos. En estos ambientes, se desarrolla un tipo de corrosión conocida como “corrosión dulce” (sweet corrosion), caracterizada por la formación de carbonato de hierro y otros productos de corrosión que pueden debilitar la estructura del acero (Vargas Gutiérrez, 2020). Si bien el acero API N80Q es ampliamente utilizado en la industria petrolera debido a sus propiedades mecánicas y su resistencia moderada a la corrosión, especialmente bajo condiciones de presión y temperatura elevadas, no es inmune al ataque corrosivo del dióxido de carbono (Suarez, 2018). Su exposición a ambientes de CO₂ puede acelerar su deterioro, lo que hace necesario el uso de inhibidores de corrosión, esto ha impulsado la búsqueda de soluciones efectivas y sostenibles para su control. En años recientes, las investigaciones se han orientado hacia el desarrollo de inhibidores ecológicos, derivados de fuentes naturales y residuos agroindustriales, como alternativa a los inhibidores sintéticos tradicionales.

En este contexto, la literatura científica reciente documenta avances significativos en el desarrollo de inhibidores verdes. Feng et al., 2018, realizaron un estudio utilizando extracto de bagazo de caña en acero API 5L X70, empleando una metodología de extracción mediante solvente etanol-agua (70:30). Sus resultados, obtenidos mediante técnicas electroquímicas como resistencia a la polarización lineal, espectroscopia de impedancia electroquímica, demostraron una eficiencia máxima de inhibición del 91% a una concentración de 800 ppm. El análisis mediante microscopia electrónica de barrido (SEM) confirmó la formación de una película protectora estable sobre la superficie metálica.

EFECTO ELECTROQUÍMICO DEL INHIBIDOR NATURAL EN ACERO API N80 Q

Por su parte, Gómez Guzmán et al., (2018), evaluaron una amida grasa sintetizada a partir de aceite de bagazo de café como inhibidor de corrosión para acero API X70 en salmuera saturada con CO_2 a $60\text{ }^\circ\text{C}$. Utilizando técnicas electroquímicas como curvas de polarización potenciodinámica, mediciones de potencial de circuito abierto, resistencia a la polarización lineal y espectroscopía de impedancia electroquímica, demostraron que una concentración de 25 ppm del inhibidor lograba una eficiencia superior al 95% en condiciones estáticas.

Avanzando en esta línea de investigación, Meng et al., (2021) estudiaron el potencial inhibidor del extracto de hojas de caña sobre acero API N80 en condiciones de saturación con CO_2 . Sus experimentos, realizados en un rango de temperatura de $25 - 80\text{ }^\circ\text{C}$, evidenciaron una eficiencia de 88% a temperatura ambiente, con esta estabilidad térmica hasta $70\text{ }^\circ\text{C}$. Las curvas de polarización Tafel y el análisis superficial XPS revelaron un mecanismo mixto de inhibición, donde los compuestos orgánicos presentes en el extracto forman una barrera protectora mediante adsorción química sobre la superficie metálica.

En una investigación más reciente, Elazabawy et al., (2023) investigaron el extracto de cáscara de naranja como inhibidor para acero API X65 en medio ácido en CO_2 , utilizando extracción asistida por ultrasonido. Sus resultados mostraron una eficiencia excepcional del 94% a 1000 ppm, con un control predominante anódico del proceso de corrosión. Un hallazgo notable fue el efecto sinérgico observado al combinar el extracto con iones Zn^{2+} , lo que mejoró significativamente la protección contra la corrosión.

La Tabla 1 informa otras investigaciones de inhibidores verdes, donde se muestran eficiencias superiores al 90 %.

EFECTO ELECTROQUÍMICO DEL INHIBIDOR NATURAL EN ACERO API N80 Q

Tabla 1

Eficiencias reportadas en la literatura de compuestos con propiedades anticorrosivas bajo diferentes condiciones.

Extracto	Medio corrosivo y temperatura	Técnicas electroquímicas	Tipo de acero	Eficiencia del inhibidor (%)
Extracto de hojas de Azadirachta indica (neem)	Solución de NaCl al 0,5 %, temperatura ambiente	Curvas de polarización potenciodinámica, espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS)	Acero al carbono AISI 1080	90 % a 200 ppm
Extracto derivado del aceite de aguacate	Solución de NaCl 3,5 %, saturado en CO ₂	Curvas de polarización Tafel, espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS)	API 5L-X52	90 % a 25 ppm
Extracto de Stevia Rebaudiana	Solución de HCL 1M	Curvas de polarización Tafel, espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS)	Acero al carbono AISI 1020	93 % a 180 ppm

Nota. Adaptado de Delgado, (2021), Zabalegui Cruz, (2019) y Burgos et al., (2018)

Como se evidencia en la Tabla 1 y en las investigaciones analizadas previamente, existe una clara tendencia en el desarrollo de inhibidores verdes con eficiencias notables, frecuentemente

EFFECTO ELECTROQUÍMICO DEL INHIBIDOR NATURAL EN ACERO API N80 Q

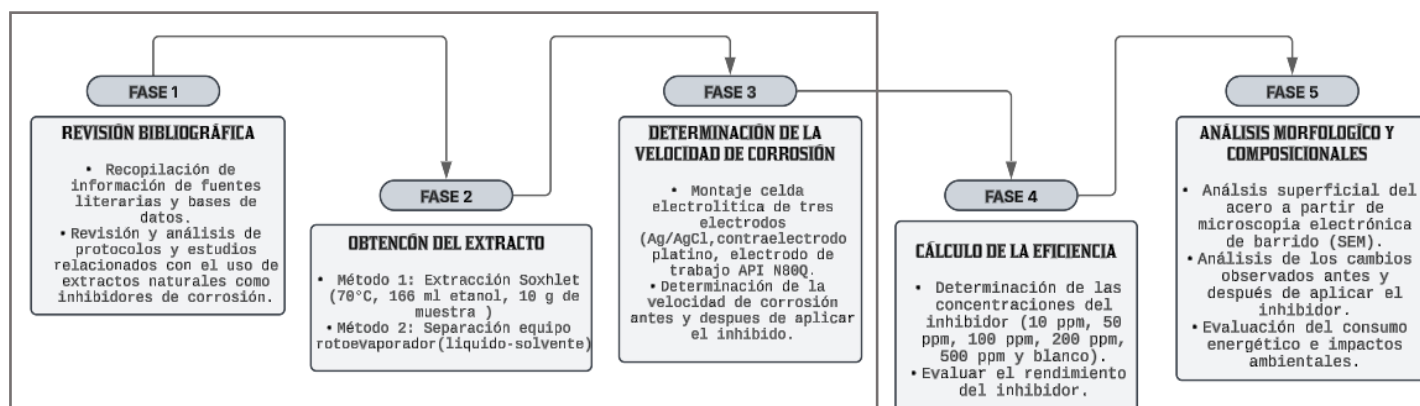
superiores al 90 %, para la protección de diversas aleaciones de acero en ambientes corrosivos. Estos estudios confirman que los extractos derivados de biomasa residual agroindustrial constituyen una alternativa prometedora y sostenible frente a los inhibidores sintéticos convencionales. Los mecanismos de inhibición identificados sugieren predominantemente la formación de una película protectora sobre la superficie metálica, con eficiencia que varían según la composición del extracto, la concentración aplicada y las condiciones de exposición. En este contexto, la evaluación del potencial inhibidor de la biomasa residual de caña panelera para proteger acero API N80 Q en ambientes ricos en CO₂ se presenta como una contribución valiosa a esta línea de investigación, aprovechando un recurso abundante en la industria panelera colombiana y alineándose con los principios de economía circular y química verde que caracterizan las tendencias actuales en el campo de la protección contra la corrosión.

3. Metodología

Para el desarrollo de este estudio se llevó a cabo la metodología representada en la Figura 1, la cual detalla las distintas fases para la evaluación electroquímica del efecto inhibitor de un extracto de biomasa residual de caña panelera en un acero API N80 Q expuesto a atmósferas de CO₂, desde la obtención del extracto hasta la evaluación de su efectividad.

Figura 1

Metodología para la obtención del extracto y evaluación de su efectividad



3.1. Fase 1: Revisión bibliográfica

Se realizó una revisión bibliográfica en las bases de datos como: Science Direct, Springer, Google Académico, Dialnet y base Scopus de la Universidad Industrial de Santander, por medio de la cual se pudo acceder a información de revistas especializadas. Se enfocó en encontrar información sobre la evaluación electroquímica de inhibidores de corrosión, el efecto de extractos de biomasa como inhibidores de corrosión, la corrosión del acero API N80 Q en atmósferas de CO₂ y los métodos para caracterizar los productos de corrosión y la eficiencia de los inhibidores.

EFFECTO ELECTROQUÍMICO DEL INHIBIDOR NATURAL EN ACERO API N80 Q

Para asegurar la relevancia de la información, se estableció una ventana de observación del año 2015 al 2025.

3.2.Fase 2: Obtención del extracto

Para la obtención del extracto, se utilizó polvo de biomasa de caña panelera pretratada con agua destilada. Esta elección se basó en estudios previos, donde se evaluaron dos tipos de pretratamiento: uno con NaOH al 10% p/v y otro con agua destilada. Los resultados indicaron que el tratamiento con agua destilada tenía un mejor desempeño, especialmente cuando se empleaba un tiempo de extracción de 4 horas. Con base en estos hallazgos, se procedió a realizarla extracción de la biomasa de caña panelera mediante el método Soxhlet, utilizando 10 g de biomasa tratada con agua destilada y 166 ml de etanol como solvente, a una temperatura de 70°C. El montaje experimental se muestra en la Figura 2.

Figura 2

Extracto de la caña panelera por medio de un equipo Soxhlet



Una vez obtenida la solución, se llevó a cabo la eliminación del solvente mediante un rotoevaporador operando a una temperatura de ebullición inferior a la del etanol (77°C), como se muestra en la Figura 3.

Figura 3

Separación líquido-solvente del extracto en un rotoevaporador



Después de realizar el montaje del equipo rotoevaporador y llevar a cabo las extracciones requeridas, se obtuvo un total de 1,4 gramos de extracto de caña panelera, asegurando así su disponibilidad para las pruebas electroquímicas para evaluar su efectividad como inhibidor de corrosión en acero API N80Q expuesto a atmósferas de CO₂.

3.3.Fase 3: Determinación de la velocidad de corrosión

Para determinar la velocidad de corrosión se inició con la preparación de una solución de NaCl al 3% p/p, con el propósito de simular las condiciones a la que estaría expuesto el acero API N80 Q. A esta solución se añadieron diferentes concentraciones de inhibidor, siguiendo la relación de 0.1 g de extracto (inhibidor) por cada 30 g de NaCl.

Asimismo, se llevó a cabo la preparación metalográfica de los cupones de acero API N80Q antes y después de las pruebas electroquímicas, dado que, al finalizar algunas de ellas presentaban presencia de productos de corrosión superficial en las muestras.

3.3.2 Preparación de la muestra

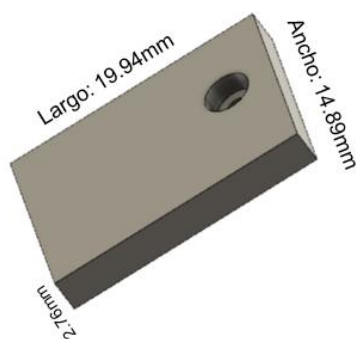
Se utilizaron dos cupones de acero API N80Q. Los cupones se maquinaron con las siguientes dimensiones: Largo: 19.94 mm, ancho: 14,89 mm, profundidad: 2.76 mm, como se

EFFECTO ELECTROQUÍMICO DEL INHIBIDOR NATURAL EN ACERO API N80 Q

relaciona en la Figura 4. Para garantizar una superficie homogénea se realizó un proceso de desbaste de los cupones siguiendo el protocolo de la norma ASTM G1-03. Los cupones de acero se sometieron a un desgaste mecánico progresivo, se inició con papel abrasivo de carburo de silicio N° 120, 180, 220, 320, 400, 600.

Figura 4

Dimensiones del cupón acero API N80Q



3.3.3 Montaje celda electroquímica

El sistema experimental consiste en una celda de 3 electrodos que contiene un electrodo de referencia Ag/AgCl, un contra electrodo de platino y un electrodo de trabajo acero API N80Q (ver Figura 5). Antes de las mediciones, la solución se saturó con CO₂ durante media hora, siguiendo el protocolo establecido de la norma ASTM G-102, la cual detalla los métodos estándar para realizar ensayos de corrosión electroquímica. Posteriormente, la celda fue conectada a un potencióstato/galvanostato (GAMRY 600), utilizando una jaula de Faraday para minimizar las interferencias causadas por el ruido y de campos eléctricos, garantizando así la precisión en la aplicación de las técnicas electroquímicas.

EFFECTO ELECTROQUÍMICO DEL INHIBIDOR NATURAL EN ACERO API N80 Q

Figura 5

Montaje celda electroquímica



3.3.4 Cálculo de la velocidad de corrosión

La norma ASTM G102-23, publicada por la Sociedad Americana para Ensayos y Materiales, es una referencia fundamental para el cálculo de velocidad de corrosión. Esta norma establece los procedimientos y ecuaciones necesarias para convertir datos de ensayos electroquímicos (como resistencia a la polarización e impedancia) en velocidades de corrosión cuantificables. Su importancia radica en que proporciona un método estandarizado para determinar la velocidad de corrosión en materiales metálicos (Sociedad Americana para Ensayos y Materiales, 2015).

3.3.4.1 Curva potenciodinámica

Después de preparar la muestra del acero API N80-Q y acondicionar la celda electroquímica con la solución de NaCl saturada con CO₂, se procede a estabilizar la muestra en dicha solución hasta alcanzar el potencial de circuito abierto. Posteriormente, utilizando el software Gamry Echem Analyst, correspondiente al equipo GAMRY INSTRUMENTS 600, se ajusta una velocidad de barrido de 0.6 V/hora y se realiza un barrido de potenciales de -1500 mV

EFFECTO ELECTROQUÍMICO DEL INHIBIDOR NATURAL EN ACERO API N80 Q

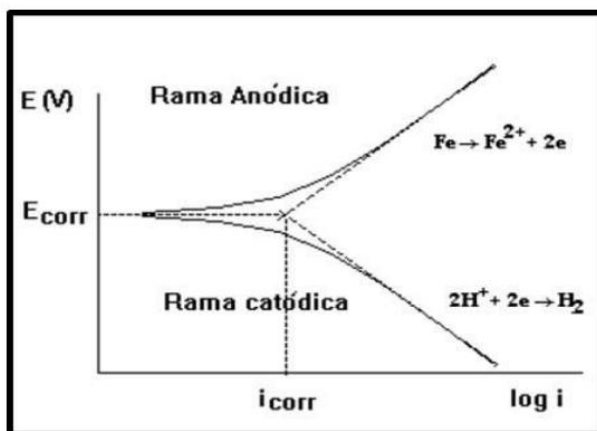
a +1500 mV con respecto al potencial de corrosión. Durante el ensayo, se registra la densidad de corriente en función del potencial aplicado.

3.3.4.2 Curvas Tafel

Una vez obtenidos los datos de las curvas potenciodinámicas, se exportaron al software Origin para realizar la extrapolación de Tafel. A partir del ajuste de las regiones lineales anódicas y catódicas, se encontraron los valores de potencial de corrosión (E_{corr}), densidad de corriente (i_{corr}), coeficientes de pendientes anódicas β_a y catódicas β_c , como se muestra en la figura 6. Con estos datos, se procedió el cálculo de velocidad de corrosión.

Figura 6

Gráfica que representa los datos de la ecuación Tafel



Nota: Adaptado de Gómez, (2016)

3.3.4.3 Resistencia a la polarización (Rp)

Siguiendo el mismo protocolo empleado en el procedimiento de curvas potenciodinámicas, se realiza el ensayo de resistencia a la polarización. Utilizando el software Gamry Echem Analyst, se ajusta una velocidad de barrido de 0.6 V/h y se lleva a cabo un barrido de potenciales en el

EFFECTO ELECTROQUÍMICO DEL INHIBIDOR NATURAL EN ACERO API N80 Q

rango de -30 mV hasta 30 mV con respecto al potencial de corrosión. Durante el ensayo, se registran los valores de corriente en función del potencial aplicado.

Los fundamentos teóricos de las técnicas utilizadas y las expresiones matemáticas aplicadas para el análisis de resultados se presentan en detalle en el Apéndice D.

3.4. Fase 4: Cálculo de la eficiencia

Para realizar el cálculo de la eficiencia se tuvo en cuenta los siguientes aspectos:

3.4.1 Condiciones de operación:

La variable de operación evaluada fue la concentración del inhibidor de corrosión, correspondiente al extracto de biomasa residual de caña panelera. Se seleccionaron cinco concentraciones diferentes (10 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 200 ppm y 500 ppm), además de un sistema de control sin inhibidor (blanco). Estas concentraciones fueron elegidas con base a estudios previos y en la literatura disponible, asegurando un rango adecuado para evaluar la eficiencia del inhibidor. Estudios como los de Burgos et al., (2018); Delgado, (2021) y Zabalegui Cruz, (2019) han utilizado concentraciones similares para evaluar la eficiencia de inhibidores naturales en ambientes con CO₂.

3.4.2 Eficiencia del inhibidor

El cálculo de la eficiencia del inhibidor se realizó utilizando los resultados obtenidos en la determinación de la velocidad de corrosión. Este análisis comparativo considera la velocidad de corrosión (V_{cor}) medida tanto en presencia como en ausencia del inhibidor. Para la estimación precisa de este rendimiento, se aplicó la ecuación 1, que permite cuantificar la eficiencia inhibitoria mediante una relación porcentual entre ambas condiciones experimentales.

$$\% \text{ de protección o eficiencia} = \frac{V_{cor}^0 (\text{sin inhibidor}) - V_{cor} (\text{con inhibidor})}{V_{cor}^0 (\text{sin inhibidor})} * 100 \quad (\text{Ec.1})$$

EFFECTO ELECTROQUÍMICO DEL INHIBIDOR NATURAL EN ACERO API N80 Q

Donde V_{cor} (sin *inhibidor*) es la velocidad de corrosión del material medida sin la presencia del inhibidor, y V^0_{cor} (con *inhibidor*) corresponde a la velocidad de corrosión del material en presencia del inhibidor.

3.5. Fase 5: Análisis morfológico y composicionales

Para realizar el análisis morfológico y composicional se tuvieron en cuenta los siguientes ítems:

3.5.1 Análisis superficial del acero al carbono a partir de microscopia electrónica de barrido (SEM)

Se realizó un análisis mediante microscopia electrónica de barrido (SEM) en el acero al carbono con y sin la aplicación del inhibidor. Esta técnica, permite observar con gran detalle los cambios en la superficie del metal, ayudando a identificar los cambios morfológicos generados por el inhibidor. Además, facilita la detección de alteraciones superficiales como picaduras, grietas o productos de corrosión, proporcionando información valiosa sobre cómo actúa el inhibidor en la protección del material.

3.5.2 Análisis de los cambios observados antes y después de la aplicación del inhibidor mediante EDS

Este análisis complementa el estudio morfológico al proporcionar un análisis elemental cuantitativo de la composición química superficial del acero al carbono tratado con inhibidor. A través del análisis por espectroscopia de dispersión de energía de rayos X (EDS), se identificaron los elementos presentes en puntos específicos de la superficie, en particular en la interfaz metal-inhibidor. Aunque el EDS no ofrece una determinación completa de la composición química total, si permite detectar de manera localizada la presencia de películas protectoras formadas, productos de corrosión y compuestos resultantes de las interacciones entre el inhibidor y el sustrato metálico.

3.5.3. Evaluación del consumo energético e impactos ambientales

Se llevó a cabo un análisis del consumo energético e impactos ambientales del proceso de obtención del extracto de caña panelera, considerando variables claves como la materia prima (bagazo de caña panelera), el consumo de energía eléctrica, el uso de agua y la cantidad de etanol empleado en las etapas de extracción con Soxhlet y separación del solvente mediante rotoevaporador. Además, se incluyó en el análisis el impacto asociado al transporte de la caña panelera hasta los laboratorios. Para estandarizar la evaluación, se desarrolló una base de cálculo de 100 kg de polvo de caña panelera. El estudio se realizó utilizando el software OpenLCA lo que permitió analizar el ciclo de vida del proceso y cuantificar su impacto ambiental en términos de consumo de recursos y emisiones generadas.

4. Resultados

4.1. Análisis electroquímico de la velocidad de corrosión del acero API N80Q a diferentes concentraciones de inhibidor.

Esta parte presenta los resultados electroquímicos que fueron logrados después de realizar la preparación del extracto y la determinación de las condiciones a trabajar de acuerdo con la metodología planteada en la sección 3.

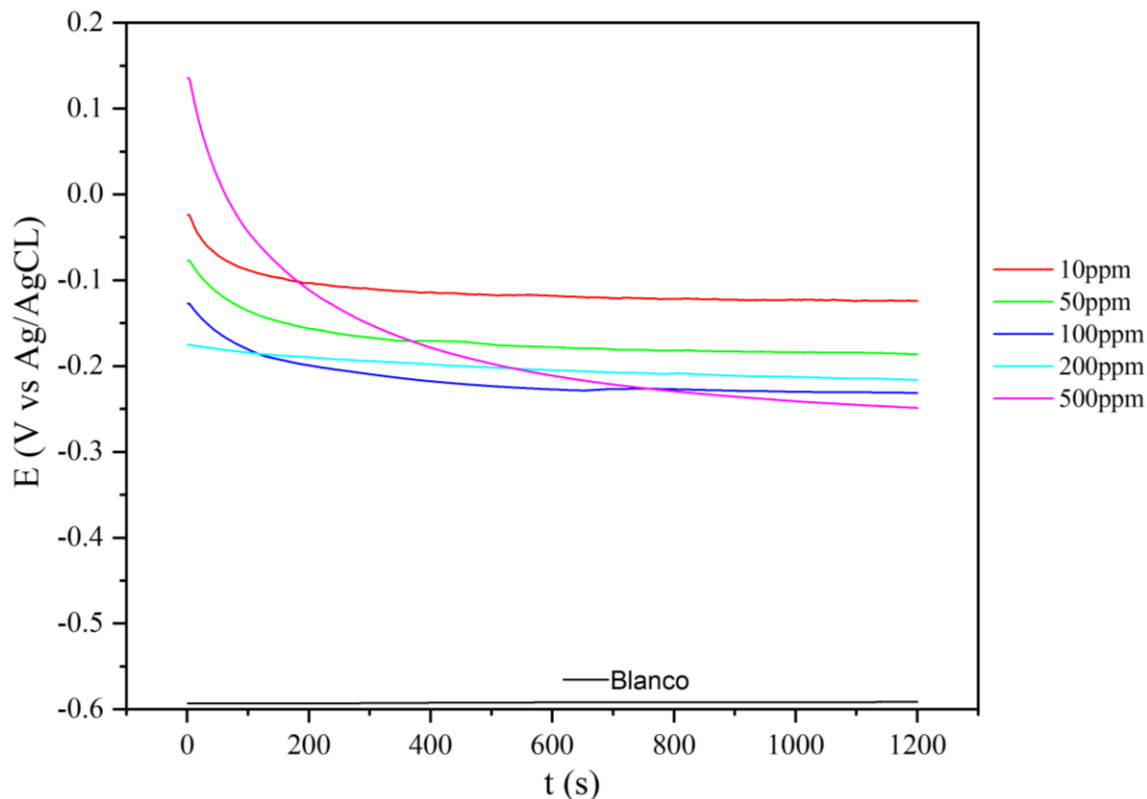
4.1.1. Graficas de potencial de circuito abierto (OCP), Resistencia a la polarización y curvas potenciodinámicas.

En la figura 7, se observa la curva de medición de potencial de circuito abierto, para el extracto de biomasa residual tratada con agua destilada a diferentes concentraciones: blanco, 10 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 200 ppm y 500 ppm. Se midió el potencial de circuito abierto durante 20 minutos, permitiendo que el sistema alcanzara un potencial estable, correspondiente al estado de equilibrio electroquímico entre las reacciones de oxidación y reducción en la superficie del electrodo, antes de aplicar las técnicas electroquímicas. Todas las concentraciones muestran un comportamiento favorable, desde el punto de vista termodinámico para inhibir la corrosión, debido a que el desplazamiento del potencial de circuito abierto es cercano a cero indica una menor tendencia de corroerse el acero, lo cual sugiere la presencia de una película protectora sobre el material.

EFECTO ELECTROQUÍMICO DEL INHIBIDOR NATURAL EN ACERO API N80 Q

Figura 7

Grafica de potencial de circuito abierto (OCP), durante 20 minutos hasta alcanzar el equilibrio ($\pm 5 \mu m \ 5 \pm 5 \ mV$) para diferentes concentraciones de la solución (10 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 200 ppm, 500 ppm y blanco).

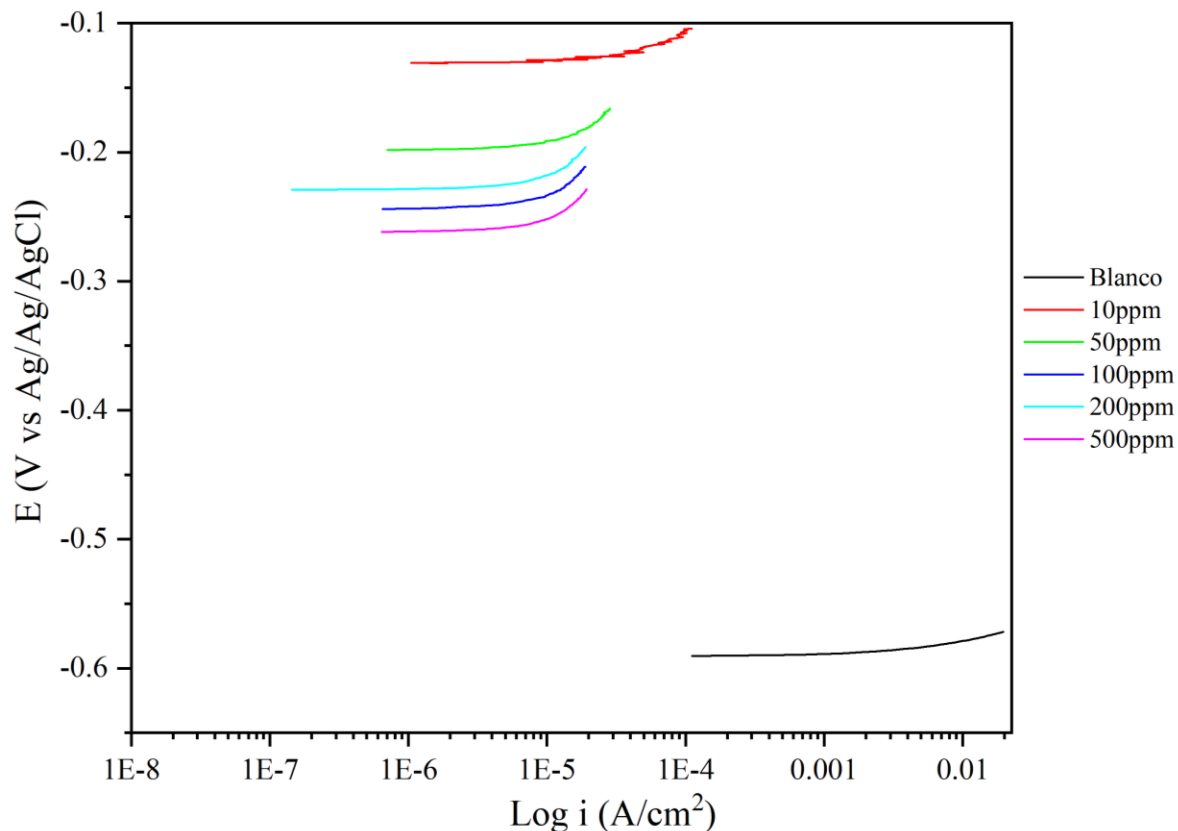


En la figura 8, se presenta la variación de la corriente en función del potencial aplicado, en un rango cercano del potencial de circuito abierto, donde se permite determinar la resistencia a la polarización (R_p). El análisis de los resultados muestra que la curva del blanco (sin inhibidor) tiene una densidad de corriente alta, lo que indica una velocidad de corrosión alta. A medida que aumenta la concentración del inhibidor disminuye la densidad de corriente, como se puede ver en las curvas correspondiente a cada concentración de inhibidor de 10 ppm a 500 ppm, lo cual mejora la resistencia a la corrosión. La muestra de 500 ppm mantiene una densidad de corriente baja, lo que indica una mayor efectividad a concentraciones altas del inhibidor de corrosión. Se observa que el valor de la resistencia a la polarización aumenta con el aumento de la concentración del inhibidor.

EFECTO ELECTROQUÍMICO DEL INHIBIDOR NATURAL EN ACERO API N80 Q

Figura 8

Grafica de Resistencia a la polarización, durante 20 minutos hasta alcanzar el equilibrio (± 5 ppm 5 ± 5 mV) para diferentes concentraciones de la solución (10 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 200 ppm, 500 ppm y blanco).

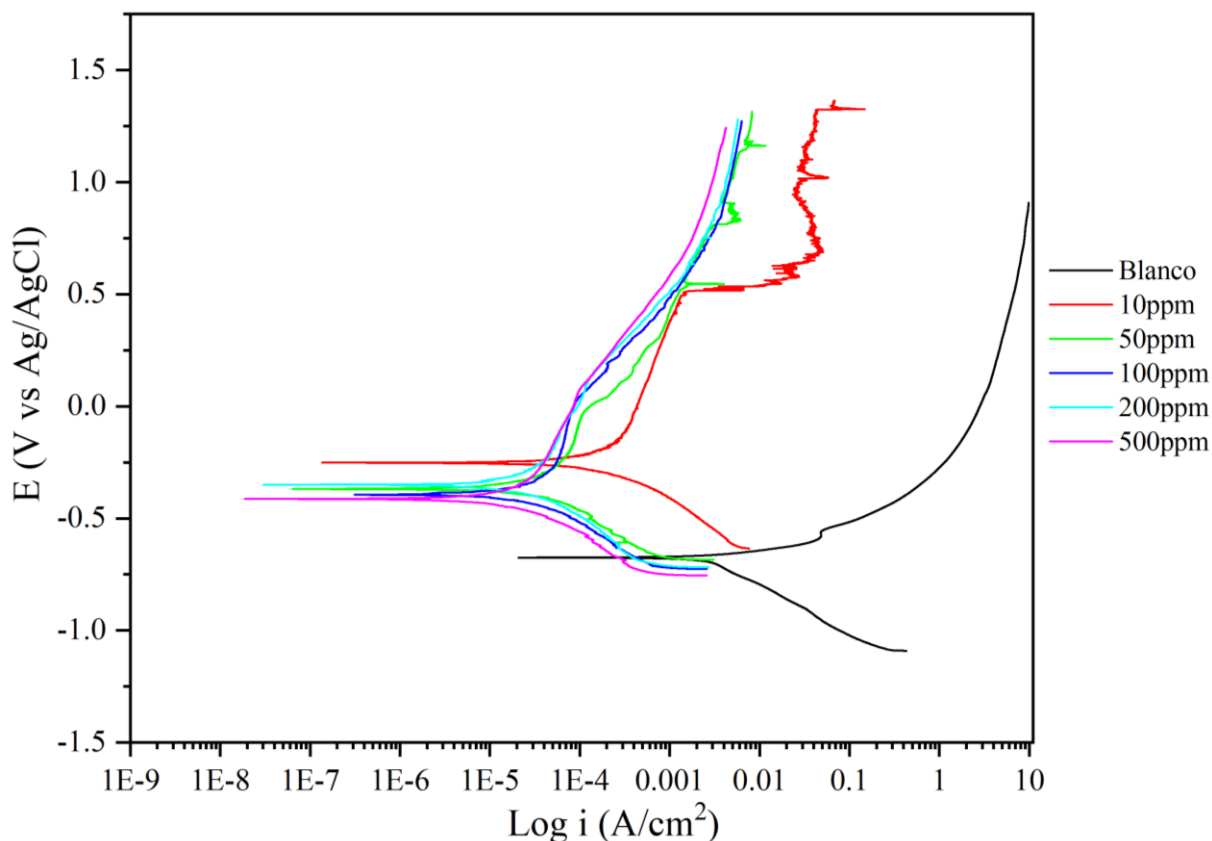


Las curvas potenciodinámicas muestran el comportamiento electroquímico del acero API N80 Q en presencia de diferentes concentraciones del inhibidor como se puede ver en la figura 9, donde se puede evidenciar que a concentraciones altas del inhibidor la protección contra la corrosión es más favorable. Esta figura permite identificar parámetros como el potencial de corrosión E_{cor} , V_{corr} , i_{corr} . Se observa además un control por transferencia de carga en todos los casos donde se usó el inhibidor y una tendencia a la pasivación a altos potenciales positivos.

EFECTO ELECTROQUÍMICO DEL INHIBIDOR NATURAL EN ACERO API N80 Q

Figura 9

Grafica de curvas potenciodinámicas, durante 20 minutos hasta alcanzar el equilibrio ($\pm 5 \mu\text{m}$ $5 \pm 5 \text{ mV}$) para diferentes concentraciones de la solución (10 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 200 ppm, 500 ppm y blanco).



A partir de las curvas potenciodinámicas obtenidas, se aplicó el método de extrapolación de Tafel, permitiendo determinar parámetros cruciales como:

- La densidad de corriente de corrosión (i_{corr})
- El potencial de corrosión (E_{corr})
- La velocidad de corrosión

EFFECTO ELECTROQUÍMICO DEL INHIBIDOR NATURAL EN ACERO API N80 Q

Un ejemplo ilustrativo de cómo se realizó la extrapolación de Tafel en Origin, incluyendo el rango de ajuste utilizado, se presenta detalladamente en la Figura 17 del Apéndice C.

Los resultados sugieren un efecto protector del inhibidor sobre el acero API N80 Q. Al compararlos con la prueba realizada sin inhibidor, las tendencias observadas en los parámetros electroquímicos refuerzan la evidencia de una actividad inhibidora frente a la corrosión. Esto podría ser debido a la combinación de efectos electroquímicos como el desplazamiento hacia el lado positivo del potencial de corrosión, la reducción de la densidad de corriente de corrosión, un aumento en la resistencia a la polarización y la tendencia a la pasivación del material. Además, los cambios en las pendientes de Tafel indican una alteración en los mecanismos de corrosión. Finalmente, el inhibidor favorece la formación de una posible película protectora, reduciendo la interacción del acero con el medio corrosivo (Zavaleta-Gutierrez, Polo-Briceño, Siche, & Angelats-Silva, 2018)

Como se observa en la Tabla 2, la concentración de 10 ppm muestra un incremento en la densidad de corriente, lo cual indica una mayor velocidad de corrosión, lo que no es favorable para la protección del material. En cambio, la concentración de 500 ppm presenta menor densidad de corriente sugiriendo una mejor protección de la superficie contra la corrosión.

En las pendientes de Tafel se proporciona información sobre los mecanismos de corrosión al diferenciar las reacciones anódicas y catódicas. La pendiente anódica (β_a) y pendiente catódica (β_c) son parámetros que reflejan la rapidez con la que las reacciones de oxidación (anódicas) y reducción (catódicas) ocurren en la superficie del material, Estas pendientes están directamente relacionadas con el potencial de corrosión del material. Como se observa en la Tabla 2, la concentración de 500 ppm muestra pendientes más moderadas tanto en la región anódica como catódica, lo que podría indicar una mejor inhibición.

EFECTO ELECTROQUÍMICO DEL INHIBIDOR NATURAL EN ACERO API N80 Q

La velocidad de corrosión mide la velocidad de degradación del material y se expresa en unidades de (mpy). Como se observa en la Tabla 2, la concentración de 10 ppm presenta una velocidad de corrosión muy alta, lo que sugiere una baja efectividad del inhibidor en esta concentración y, por lo tanto, una menor protección contra la corrosión. Por otro lado, realizando una comparación entre la muestra del blanco (sin inhibidor) y las muestras con inhibidor presentan una velocidad de corrosión menor, lo que quiere decir que el inhibidor es efectivo bajo esas condiciones. A medida que aumenta la concentración de inhibidor la velocidad de corrosión disminuye. Particularmente la muestra de 500 ppm presenta una velocidad de corrosión más baja, lo que indica una mayor eficiencia del inhibidor y una mejor protección contra la corrosión.

Tabla 2

Parámetros de las pendientes Tafel y las velocidades de corrosión del acero a diferentes concentraciones de inhibidor y a 25C.

Concentraciones	log i_{corr} (A/cm ²)	i_{corr} (μA/cm ²)	E _{corr} (V Vs			V _{corr} (mpy)
			Ag/AgCl)	β_a (V*dec-1)	β_c (V *dec-1)	
Blanco	3.23E-03	3.23E+03	-0.6782	0.1852	0.3174	1.49E+03
10ppm	1.94E-04	1.94E+02	-0.2544	0.5971	0.134	8.93E+01
50ppm	2.67E-05	2.67E+01	-0.3624	0.48508	0.2147	1.23E+01
100ppm	2.85E-05	2.85E+01	-0.393	0.3376	0.1153	1.31E+01
200ppm	2.39E-05	2.39E+01	-0.3435	0.5638	0.1238	1.10E+01
500ppm	1.01E-05	1.01E+01	-0.4135	0.3128	0.1213	4.64E+00

En la Tabla 2, se observa que, en la concentración de 10 ppm, la corriente de corrosión $i_{corr}=1.94E+2\mu A/cm^2$ es menor que la del blanco $i_{corr}=3.23E+3\mu A/cm^2$, pero la velocidad de corrosión $V_{corr}=8.93E+01$ mpy sigue siendo alta, lo que indica una protección parcial. La relación entre la corriente de corrosión i_{corr} y la velocidad de corrosión V_{corr} no siempre es lineal, ya que otros factores como las pendientes anódicas β_a y catódica β_c , así como el potencial de corrosión E_{corr} , influyen en el proceso. En la concentración de 50 ppm, aunque i_{corr} es menor que en el blanco, la velocidad de corrosión sigue siendo alta debido a la baja eficiencia del inhibidor, un β_c menor

EFFECTO ELECTROQUÍMICO DEL INHIBIDOR NATURAL EN ACERO API N80 Q

y un E_{corr} más negativo, lo que mantiene activa la reacción de corrosión (Garcés , Troconis, Maldonado, Castro, & Andrade, 2020).

4.2. Cálculo de la eficiencia

El análisis de las pruebas electroquímicas para evaluar el inhibidor de corrosión del extracto de biomasa residual de caña panelera sobre el acero API N80 Q mostró resultados prometedores en cuanto a la eficiencia del inhibidor como se observó en la Tabla 3. A través de las curvas potenciodinámicas y el método de extrapolación de Tafel, se determinaron parámetros claves como la densidad de corriente, potencial de corrosión y la velocidad de corrosión. Los resultados determinan que la concentración de 500 ppm del inhibidor ofrece una mejor protección contra la corrosión, al presentar menores valores de densidad de corriente, pendientes de Tafel más moderadas y una velocidad de corrosión más baja en comparación con las demás concentraciones.

Tabla 3

Eficiencias de inhibición en la protección del acero API N80 Q a distintas concentraciones de inhibidor

Concentraciones	%Eficiencia
Blanco	
10ppm	94.00%
50ppm	99.17%
100ppm	99.12%
200ppm	99.26%
500ppm	99.69%

4.3. Microscopia electrónica de barrido (SEM-EDS)

Los resultados de SEM fueron obtenidos mediante el microscopio de electrónico de barrido Scios2, equipado con un sistema de rayos X por energía dispersa de la marca Bruker. El análisis

EFFECTO ELECTROQUÍMICO DEL INHIBIDOR NATURAL EN ACERO API N80 Q

morfológico para el efecto del inhibidor de corrosión en el acero API N80, se realizó a 3 muestras utilizadas en las pruebas electroquímicas, la primera un blanco (sin inhibidor), 200 ppm y otra a 500 ppm de inhibidor.

En la figura 10 se observa la muestra sin inhibidor de corrosión, en la solución de estudio CO_2 por 30 min. Se puede ver un daño sobre la superficie del metal, generado por la presencia de productos de corrosión adheridos a la superficie del material, como muestra en la tabla 4 la caracterización elemental mediante energía dispersiva de rayos X (EDS).

Figura 10

Microscopia electrónica de barrido (SEM-EDS) de la muestra sin inhibidor de corrosión

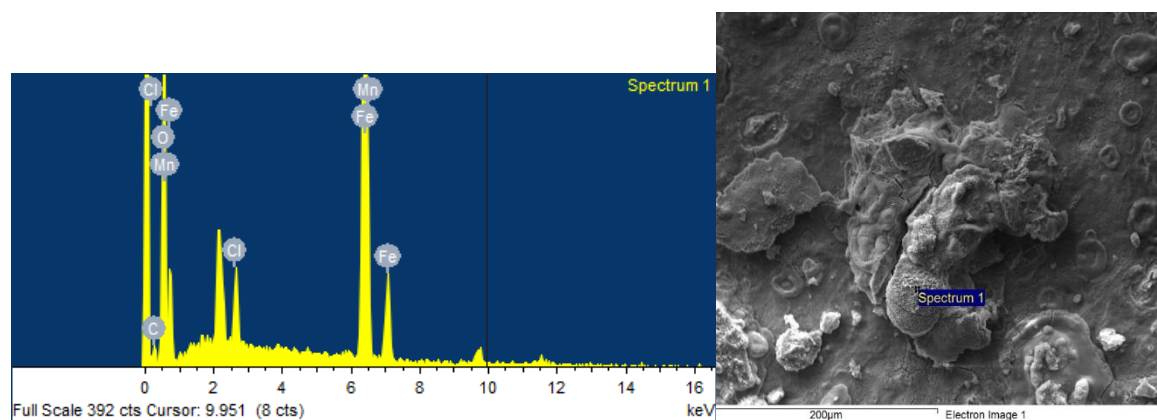


Tabla 4

Caracterización elemental determinada por EDS en un punto de la superficie del acero sin inhibidor

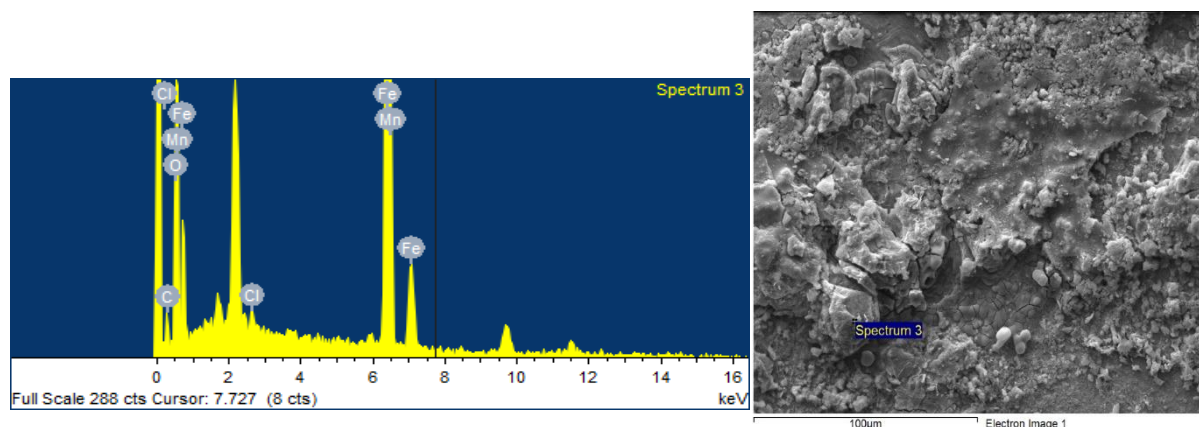
Element	Wt%	At%
C K	4.09	10.39
O K	26.76	51.04
Cl K	2.53	2.17
Mn K	0.39	0.21
Fe K	66.23	36.18

EFECTO ELECTROQUÍMICO DEL INHIBIDOR NATURAL EN ACERO API N80 Q

En la figura 11 se puede observar la muestra con 200 ppm de inhibidor de corrosión. Se puede ver que el inhibidor inicia la formación de una capa protectora sobre la superficie del material, la cual no estaba distribuida de una manera uniforme, lo que permite la presencia de productos de corrosión como se muestra en la figura 11. Mediante la caracterización elemental EDS (tabla 5) se identificó un aumento en el contenido de hierro (Fe) del 66.23% al 67.19%, por lo cual es posible inferir que el inhibidor está brindando cierta protección al material, también se observaron reducciones en los porcentajes de cloro y oxígeno, con valores de 0.58% y 23.87%, en comparación con la muestra sin inhibidor, lo que indica una menor presencia de productos clorados. A pesar, de los inicios de protección, todavía se evidencian defectos morfológicos en la superficie, lo que se puede decir que a esta concentración no es completamente efectivo el inhibidor

Figura 11

Microscopia electrónica de barrido (SEM-EDS) de la muestra con 200ppm de inhibidor de corrosión.



EFECTO ELECTROQUÍMICO DEL INHIBIDOR NATURAL EN ACERO API N80 Q

Tabla 5

Composición elemental determinada por EDS en un punto de la superficie del acero 200 ppm inhibidor

Element	Wt%	At%
C K	7.63	18.91
O K	23.87	44.4
Cl K	0.58	0.48
Mn K	0.73	0.4
Fe K	67.19	35.81

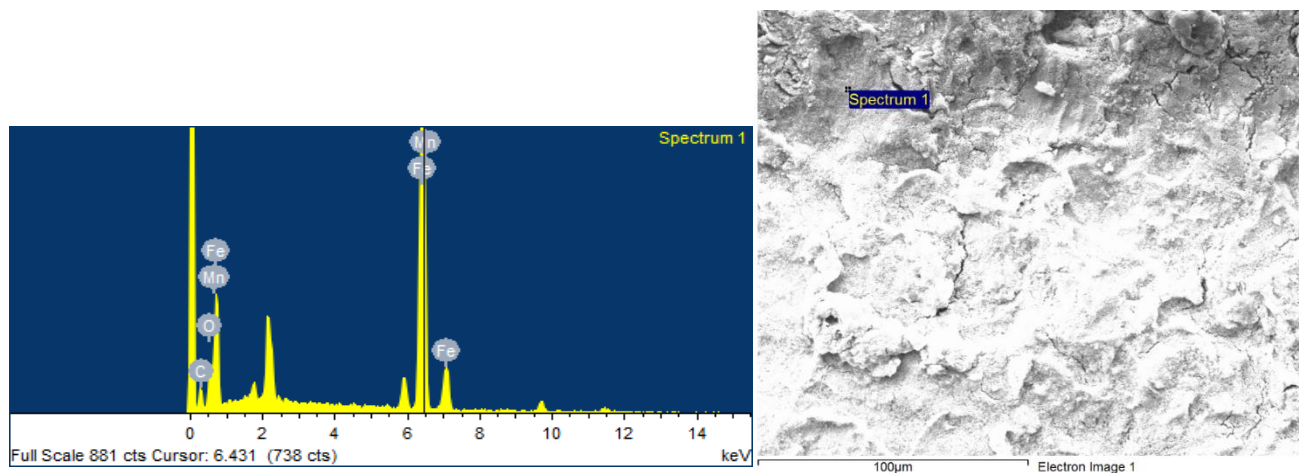
En la figura 12 se puede observar la muestra expuesta a una concentración de 500 ppm de inhibidor. Al realizar una comparación con las pruebas anteriores, se puede notar que a esta concentración el inhibidor forma una capa protectora uniforme sobre el material, con una importante reducción de defectos morfológicos. Por medio de la caracterización EDS, se observa que no hay presencia de Cl y el contenido de oxígeno disminuyó a un 7.19%, lo que refleja que a la concentración de 500 ppm el inhibidor de bagazo de caña panelera actúa con mayor eficiencia como inhibidor de corrosión.

Además, al realizar la comparación de los EDS de la prueba del blanco y 200 ppm de inhibidor, se evidencia la presencia de iones de cloro en la superficie del material, lo cuales son causantes de corrosión. Mientras que la concentración de 500 ppm no se observa estos iones, favoreciendo así la reducción de la velocidad de corrosión sobre el acero, como se puede ver en la tabla 6.

EFECTO ELECTROQUÍMICO DEL INHIBIDOR NATURAL EN ACERO API N80 Q

Figura 12

Microscopía electrónica de barrido (SEM-EDS) de la muestra con 500ppm de inhibidor de corrosión

**Tabla 6**

Caracterización elemental determinada por EDS en un punto de la superficie del acero 500 ppm inhibidor

Element	Wt%	At%
C K	10.93	32.18
O K	7.19	15.89
Mn K	6.06	3.9
Fe K	75.83	48.02

4.4 Evaluación del consumo energético e impactos ambientales

La evaluación del impacto ambiental mediante el software OpenLCA revela un contraste significativo en la contribución al calentamiento global entre los distintos elementos analizados (Figura 13). Se observa que el consumo de energía eléctrica (barra verde) presenta un impacto notablemente menor ($6.444E3$ kg CO₂ eq) en contraste con la significativa huella de carbono asociada a la producción de materiales primarios (barras roja y azul), cuyos impactos alcanzan $1.519E5$ kg CO₂ eq y $6.925E4$ kg CO₂ eq, respectivamente. Este hallazgo es fundamental, ya que

EFECTO ELECTROQUÍMICO DEL INHIBIDOR NATURAL EN ACERO API N80 Q

evidencia la que predominó la obtención de materiales sobre la fase operativa de calentamiento global en el ciclo de vida del proceso.

En la Tabla 7, se presenta los parámetros y datos considerados para el análisis en el software OpenLCA.

Tabla 7

Parámetros utilizados en el OpenLCA.

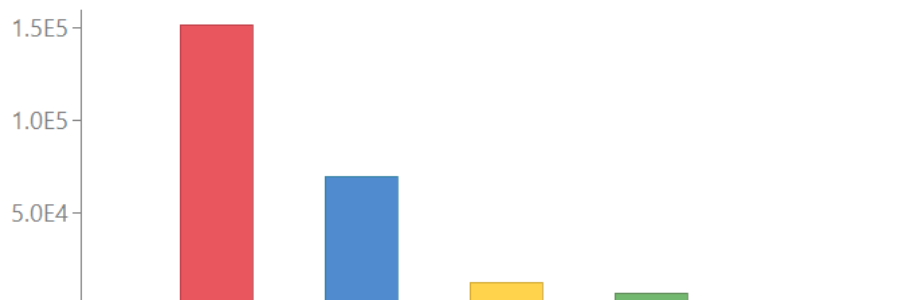
Parámetros	Cantidad	Unidad
Inhibidor	16	kg
Agua Soxleth	2400000000	ml
Agua Rotoevaporador	20000000	ml
Etanol		
Rotoevaporador	10000000	ml
Etanol Soxleth	14623360	ml
Energía Soxleth	20000	kWh
Energía		
Rotoevaporador	3000	kWh
Polvo caña panelera	792,354	kg
Extracto con Etanol	12036,21	kg/ml

En la Figura 13, se ilustra los resultados de la evaluación del consumo energético y los impactos ambientales, análisis realizado utilizando el Software OpenLCA.

EFECTO ELECTROQUÍMICO DEL INHIBIDOR NATURAL EN ACERO API N80 Q

Figura 13

Resultados evaluación del consumo energético e impactos ambiental mediante el software OpenLCA



Este hallazgo es especialmente relevante, ya que indica que la fase de obtención de materiales tiene un peso mucho mayor que en el calentamiento global que la fase operativa relacionada con el consumo energético. Eso ha permitido identificar con claridad que, dentro del ciclo de vida evaluado, la fase de extracción y producción de materiales representa el principal punto crítico en términos de huella ambiental. Aunque el consumo energético en las etapas operativas (Soxhlet y rotoevaporador) tiene una participación considerable, su impacto relativo es significativamente menor comparado con el de los insumos materiales, particularmente los relacionados con el polvo de caña panelera y los solventes utilizado. Por otro lado, el bajo impacto relativo del consumo energético puede reflejar una matriz energética con alta participación de fuentes renovables o una operación eficiente, lo cual es positivo y contribuye a reducir la huella ambiental global del proceso.

5. Conclusiones

A través de técnicas de potencial de resistencia a la polarización y curvas potenciodinámicas, se evaluó electroquímicamente el efecto inhibitor de biomasa residual de caña panelera en el acero API N80Q expuesto a atmosferas de CO₂ y una solución de cloruro de sodio. Este estudio demostró la notable capacidad del extracto para inhibir eficazmente la corrosión del acero API N80Q, evidenciando su potencial como una posible alternativa sostenible para la protección de este material en entornos corrosivos industriales.

Por medio de las técnicas electroquímicas como resistencia a la polarización, Tafel y curvas potenciodinámicas, permitió determinar que la velocidad de corrosión del acero API N80Q varió significativamente en función de la concentración del extracto de biomasa residual de caña panelera. Se identificó que la concentración de 500 ppm fue la más efectiva alcanzando una $V_{corr} = 4.64$ mpy.

El cálculo de la eficiencia de inhibición reveló que el extracto de biomasa residual de caña panelera alcanzó una efectividad del 99.62% a una concentración de 500 ppm, proporcionando una protección sustancial contra la corrosión del acero API N80Q. Este hallazgo subraya la importancia de optimizar la dosificación del inhibidor, ya que concentraciones inferiores mostraron una menor capacidad protectora, mientras que se sugiere evitar una posible sobresaturación que pudiera afectar la adherencia del inhibidor.

Los resultados del análisis de la superficie del acero API N80Q mediante Microscopia Electrónica de Barrido (SEM) se evidenció la formación de una película protectora uniforme tras el tratamiento con el extracto de biomasa residual de caña panelera, lo que se correlacionó con una menor evidencia de deterioro superficial con el acero a la concentración de 500 ppm en comparación sin inhibir y con la de 200 ppm de inhibidor. La espectroscopia de energía dispersiva

EFECTO ELECTROQUÍMICO DEL INHIBIDOR NATURAL EN ACERO API N80 Q

de rayos X (EDS) confirmó la presencia de elementos clave como carbono y oxígeno en esta película, sugiriendo la formación de un recubrimiento pasivante mezclado con óxidos e hidróxidos que pueden proteger el acero tanto física como químicamente al reducir su reactividad en el ambiente corrosivo.

6. Recomendaciones

Se sugiere la realización de estudios adicionales con el fin de obtener la concentración óptima del extracto de biomasa residual extracto de caña panelera en condición de varios climas y exposición a sustancias ambientales. Estos se refieren a investigar la eficiencia del inhibidor como la presencia de otros contaminantes ambientales o condiciones de temperatura y presión diversas, por lo que este podrá ser perfectamente adaptada para incrementar el rendimiento y su eficacia en la protección contra la corrosión sobre acero API N80 Q.

Se recomienda desarrollar métodos para asegurar una aplicación uniforme del inhibidor anticorrosivo en la superficie del metal. Entre los métodos a evaluar se encuentran la inmersión, la pulverización y la incorporación del inhibidor en sistemas de circulación de fluidos. Asimismo, se recomienda explorar estrategias de reutilización y aplicación en ciclos de mantenimiento, lo que favorecería la eficiencia del producto y reduciría costos operativos en la industria metalúrgica.

Referencias bibliográficas

- Abdou, M., & EL-Haddad, M. (5 de 03 de 2025). Novel eco-friendly quinolinone derivative as a water-soluble corrosion inhibitor for low carbon steel: Synthesis, inhibitive efficacy, and DFT analysis. *Journal of Molecular Structure*, 1324. doi:<https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2024.140889>
- Abdullah, M., Nazir, M., Hussein, H., Shah, S., Azra, N., Iftikhar, R., . . . Shaharah, M. (2024). New perspectives on biomass conversion and circular economy based on Integrated Algal-Oil Palm Biorefinery framework for sustainable energy and bioproducts co-generation. *Industrial Crops and Products*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118452>
- Ait Mansour, A., Ala Allah, A., Lgaz , H., Messali, M., Lee , H.-s., Bazzi, L., . . . Hammouti , B. (2025). Evaluation of N80 Carbon Steel Corrosion in 15 wt.% HCl Using Isatin-hydrazones: A Comprehensive Approach with Chemical, Electrochemical Techniques, and DFTB Calculations. *Evaluation of N80 Carbon Steel Corrosion in 15 wt.% HCl Using Isatin-hydrazones: A Comprehensive Approach with Chemical, Electrochemical Techniques, and DFTB Calculations*, 1321. doi:<https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2024.139910>
- Aristizábal, M., & Valencia, L. (2015). DISEÑO CONCEPTUAL DE UN GASIFICADOR PARA LA PRODUCCIÓN DE GAS DE SÍNTESIS A PARTIR DE RESIDUOS DE PODA GENERADOS EN LA UNIVERSIDAD EAFIT. Medellín: Universidad EAFIT.
- Berrocal, M., & Altamiranda, E. (2013). EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA INHIBIDORA DE CORROSIÓN DEL EXTRACTO ACUOSO DE AGUACATE (*Persea americana*). Cartagena de Indias D.T y C.: Universidad de Cartagena.

EFECTO ELECTROQUÍMICO DEL INHIBIDOR NATURAL EN ACERO API N80 Q

Burgos, N. J., Mollica, A. S., Navarro, A. M., & Pastrana, P. P. (2018). Evaluación de Stevia Rebaudiana como inhibidor ecológico de la corrosión del acero al carbono en medio ácido.

Cáceres, A., Casales, M., & Martinez, L. (2019). A comparative study of gravimetric and electrochemical techniques for the evaluation of corrosion inhibitor activity onset and efficiency in pipeline CO₂ environments. <https://www.scielo.cl/pdf/ingeniare/v27n4/0718-3305-ingeniare-27-04-625.pdf>

Castro, F. (2022). Canadá invierte en nuevo sistema de energía renovable de Glasgow. Rumbo Minero. Obtenido de <https://www.rumbominero.com/canada/canada-invierte-en-nuevo-sistema-de-energia-renovable-de-glasgow/>

Delgado, R. V. (2021). Evaluación del extracto de hoja del árbol de neem (*Azadirachta indica*) como inhibidor de corrosión en concreto reforzado expuesto a un ambiente salino.

Elazabawy, O. E., Attia, E. M., Shawky, N. H., & Hyba, A. M. (2023). Eco-friendly orange peel extract as corrosion resistant for carbon steel's deterioration in petroleum formation water. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-47916-w>

Feng, L., Zhang, S., Qiang, Y., Xu, S., Tan, B., & Chen, S. (2018). The synergistic corrosion inhibition study of different chain lengths ionic liquids as green inhibitors for X70 steel in acidic medium. *Materials Chemistry and Physics*, 215, 229–241. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2018.04.054>

Galvez, C. (2018). Análisis de co-palabras aplicado a los artículos muy citados en *Biblioteconomía y Ciencias de la Información* (2007-2017). *Transinformação* 30 (03). doi:<https://doi.org/10.1590/2318-08892018000300001>

EFECTO ELECTROQUÍMICO DEL INHIBIDOR NATURAL EN ACERO API N80 Q

Garcés, P., Troconis, O., Maldonado, E., Castro, P., & Andrade, C. (2020). Recomendaciones sobre velocidad de corrosión. ALCONPAT Internacional. doi:<https://doi.org/10.21041/AlconpatInternacional/RecTec/2020-03->

Giourntas, L., Brownlie, F., Karafyllias, G., Hodgkiess, T., & Galloway, A. (2016). Effect of corrosion on abrasive wear in a range of materials. Conference: 23rd International Conference of Fluid Sealing.

Gómez Guzmán, N. B., Básicas, C., & Aplicadas, Y. (2018). Evaluación de Inhibidores de la Corrosión Derivados del Bagazo de Café para el acero X-70 en salmuera con CO₂.

Gómez, J. (2023). Transición energética sostenible, el inicio de una nueva transformación en la humanidad. Universidad Externado de Colombia. Obtenido de <https://medioambiente.uexternado.edu.co/transicion-energetica-sostenible-el-inicio-de-una-nueva-transformacion-en-la-humanidad/>

Gómez, V. (2016). EFICIENCIA DE UN INHIBIDOR VERDE EXTRAIDO DE CASCARA DE MANZANA MEDIANTE EL SISTEMA SOXHLET EN LA CORROSION DEL ACERO 1018 EN MEDIO ACIDO.

https://node1.123dok.com/dt02pdf/123dok_es/000/393/393514.pdf.pdf?X-Amz-Content-Sha256=UNSIGNED-PAYLOAD&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential=7PKKQ3DUV8RG19BL%2F20231118%2Fdc%2Fs3%2Faws4_request&X-Amz-Date=20231118T165544Z&X-Amz-SignedHeaders=host&X-Amz-Expires=600&X-Amz-Signature=4d3544ecef4081d3777a23c12a3c9eacc9bc87ecc89b3133a754aded8eb5ee1

EFECTO ELECTROQUÍMICO DEL INHIBIDOR NATURAL EN ACERO API N80 Q

GREENHEISS. (2021). Aumento de la biomasa: Tendencia creciente para la sostenibilidad.

Obtenido de <https://www.greenheiss.com/aumento-de-la-biomasa/#:~:text=Aumento%20de%20la%20biomasa%3A%20Tendencia%20creciente%20para%20la%20sostenibilidad,-6%20septiembre%2C%202021&text=Hoy%20en%20d%C3%ADa%20la%20biomasa,produciendo%20calor%20para%20las%20viviendas.>

Jan van, N., & Waltman, L. (2023). Manual for VOSviewer version 1.6.20. Universiteit Leiden & CWTS Meaningful metrics.

Jiménez, H. (2011). INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DE ELECTRODEPOSICIÓN EN LA RESISTENCIA CORROSIÓN DE RECUBRIMIENTOS Sn-Ni. Universidad Pontificia Bolivariana.

Khalid, H., Amin, F., Gao, L., Chen, L., Chen, W., Javed, S., & Li, D. (2024). Syngas conversion to biofuels and biochemicals: a review of process engineering and mechanisms. *Sustainable Energy Fuels*, 8. doi:<https://doi.org/10.1039/D3SE00916E>

Leahy, S. (2017). India lidera el mayor proyecto de energía limpia del mundo. *Medio Ambiente. National Geographic*. Obtenido de <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/2017/05/india-lidera-el-mayor-proyecto-de-energia-limpia-del-mundo>

Limaymanta, C. (2020). El mapeo científico con VOSviewer: un ejemplo con datos de WoS. *Revista Otlet*. Obtenido de <https://www.revistaotlet.com/tips-cesar-limaymanta-mapeo-cientifico-con-vosviewer/>

EFECTO ELECTROQUÍMICO DEL INHIBIDOR NATURAL EN ACERO API N80 Q

Limaymanta, C. (2020). El mapeo científico con VOSviewer: un ejemplo con datos de WoS.

Revista Otlet. Obtenido de <https://www.revistaotlet.com/tips-cesar-limaymanta-mapeo-cientifico-con-vosviewer/>

Meng, S., Liu, Z., Zhao, X., Fan, B., Liu, H., Guo, M., & Hao, H. (2021). Efficient corrosion inhibition by sugarcane purple rind extract for carbon steel in HCl solution: Mechanism analyses by experimental and: In silico insights. *RSC Advances*, 11(50), 31693–31711. <https://doi.org/10.1039/d1ra04976c>

Naciones Unidas. (2024). Energías renovables: energías para un futuro más seguro. Acción por el Clima. Obtenido de <https://www.un.org/es/climatechange/raising-ambition/renewable-energy>

Njoku, C. N., Ikeuba, A. I., Anorundu, C. C., Shammah, I. C., Yakubu, E., Elendu, B. N., Enechukwu, C. S., Uduma, I. O., & Uzor, P. C. (2024). A review of the extraction and application of eco-friendly biomass for corrosion protection of metals. In *Results in Chemistry* (Vol. 7). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2023.101286>

Pelesk, A., & Otmacic, H. (2025). Comparative Study of Volatile Corrosion Inhibitors in Various coatings. doi:<https://doi.org/10.3390/coatings15010094>

R. Holla, B., Mahesh, R., Manjunath, H. R., & Anjanapura, V. R. (2024). Plant extracts as green corrosion inhibitors for different kinds of steel: A review. In *Heliyon* (Vol. 10, Issue 14). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33748>

Rodríguez, J. F., Rodríguez, E., Suárez, L. F., Velasco, K. T., Ramos, C., & Malagón, E. (2020). Eficiencia de un inhibidor verde extraído de la cáscara de la sandía en la corrosión del acero

EFECTO ELECTROQUÍMICO DEL INHIBIDOR NATURAL EN ACERO API N80 Q

estructural A36 evaluado en medios ácido y salino. Revista ION, 33(1).

<https://doi.org/10.18273/revion.v33n1-2020003>

Salamanca, A. (2018). EVALUACIÓN DE UN INHIBIDOR DE INCRUSTACIÓN PARA EVITAR TAPONAMIENTO DE LAS LÍNEAS DE PRODUCCIÓN EN UNA PLATAFORMA PETROLERA. Bogotá: Fundación Universidad de América.

Sampeiro, J., & Martínez, A. (2010). Bioenergía. Ciencia.

Sánchez, J. (2024). EFECTO DEL ACABADO SUPERFICIAL EN LA RESISTENCIA A CORROSIÓN POR PICADURA EN UN ACERO INOXIDABLE MARTENSÍTICO. Bogotá: FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA.

Shahabuddin, M., & Bhattacharya, S. (2022). Substituting coal with renewable biomass for electricity production using co-gasification technique: A short-term sustainable pathway for developing countries. *Renewable Energy and Sustainability: Prospects in the Developing Economies*. 179- 202. doi:10.1016/B978-0-323-88668-0.00002-4

Shang, Z., & Zhu, J. (2021). Overview on plant extracts as green corrosion inhibitors in the oil and gas fields. In *Journal of Materials Research and Technology* (Vol. 15, pp. 5078–5094). Elsevier Editora Ltda. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.10.095>

Shawish,, I., Hammud, H., Aljamhi, W., Abd El-Lateef, H., B. Z. Arfan, N., S. A. Hamid, M., . . . El-Faham, A. (2025). Enhanced Protection of Carbon Steel Against Acid Corrosion: Synergistic Effect of s-Triazine-Anilino-Morpholino-Pyrazolyl Hybrids Through Electrochemical and Computational Insights. *ChemElectroChem*. doi:10.1002/celc.202400515

EFECTO ELECTROQUÍMICO DEL INHIBIDOR NATURAL EN ACERO API N80 Q

Soares da Silva, R., Selva Filho, A., Faccioli, Y., Silva, Y., Oliveira, K., Araujo, G., . . . Sarubbo.

(2024). Application of Pseudomonas cepacia CCT 6659 Biosurfactant as a Metal Corrosion Inhibitor in a Constructed Accelerated Corrosion Chamber (ACC). Fermentation. doi: <https://doi.org/10.3390/fermentation10120602>

Sociedad Americana para Ensayos y Materiales. (2015). Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements. ASTM G102-89(2015)e1.

Sociedad Americana para Ensayos y Materiales. (n.d.). Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and (Shawish,, y otros, 2025) Related Information from Electrochemical Measurements 1. <https://doi.org/10.1520/G0102-23>

Soriano, A. (2022). *Analisis del mecanismo de corrosion en vidrios matalicos binarios Ni-Nb de composicion eutéctica a diferentes pH* [Universidad nacional autonoma de méxico]. <https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000823696/3/0823696.pdf>

Suarez, J. (2018). *EVALUACION DE INHIBIDORES DE CORROSION APLICADOS EN LA INDUSTRIA MEDIANTE PRUEBAS ELECTROQUIMICAS*. https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/handle/001/3107/TGT_1622.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Thompson, M. (2024). Escenario energético en la India: estrategias y políticas de transición. Sigmaearth. Obtenido de <https://sigmaearth.com/es/energy-scenario-in-india-transition-strategies-and-policies/>

EFECTO ELECTROQUÍMICO DEL INHIBIDOR NATURAL EN ACERO API N80 Q

Torres, L., Montes, A., Vázquez, G., & Pérez, E. (2019). Uso de curvas de polarización para entender el transporte de iones a través de una membrana de intercambio iónico. *Educación química*. doi:<https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2019.4.67333>

Ungureanu, N., Vlăduț, V., & Biriș, S. Ștefan. (2022). Sustainable Valorization of Waste and By-Products from Sugarcane Processing. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 14, Issue 17). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su141711089>

Universidad Europea. (2023). ¿Qué tipos de energías renovables existen y cuál es su relevancia? Obtenido de <https://colombia.universidadeuropea.com/blog/energias-renovables/>

Vargas Gutierrez, E. (2020). UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA.

Vergara, O. (2018). INHIBIDORES DE CORROSIÓN EFICIENTES A TEMPERATURAS POR ENCIMA DE LA AMBIENTE. Bogotá: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

Vilela, A. (2023). China se convertirá en importador neto de biomasa «en un futuro próximo». *H2 Business News*. Obtenido de <https://h2businessnews.com/china-se-convertira-en-importador-neto-de-biomasa-en-un-futuro-proximo/>

Zabalegui Cruz, A. (2019). SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE GEMINI-SURFACTANTE DERIVADO DEL ACEITE DE AGUACATE COMO INHIBIDOR DE LA CORROSIÓN EN MEDIO DULCE (CO₂).

EFECTO ELECTROQUÍMICO DEL INHIBIDOR NATURAL EN ACERO API N80 Q

Zavaleta-Gutiérrez, N., Polo-Briceño, E., Siche, R., & Angelats-Silva, L. (2018). Inhibición de la corrosión del acero ASTM A192 en solución de ácido clorhídrico por el mucilago de *Linum usitatissimum*. *Revista Materia*, 23(2). <https://doi.org/10.1590/s1517-707620180002.0390>

Apéndices

Apéndice A. Composición química del acero API N80Q

En este apéndice se presenta la composición química elemental del acero API N80Q utilizado como electrodo de trabajo en la presente investigación. La determinación de estos porcentajes en peso se realizó mediante espectroscopia de emisión por chispa en la Sede Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander. Los resultados obtenidos de este análisis se resumen en la Tabla 8.

Tabla 8

Composición química del acero API N80Q

% Porcentaje en peso							
%C	%P	%S	%Si	%Mn	%Ni	%Cu	%Cr
0.225	0.013	<0.150	0.308	1.424	0.0077	0.0081	0.011

Nota. Adaptado Peña Saavedra & Quintero Ballena, (2023)

Apéndice B. Metalografía del N80Q

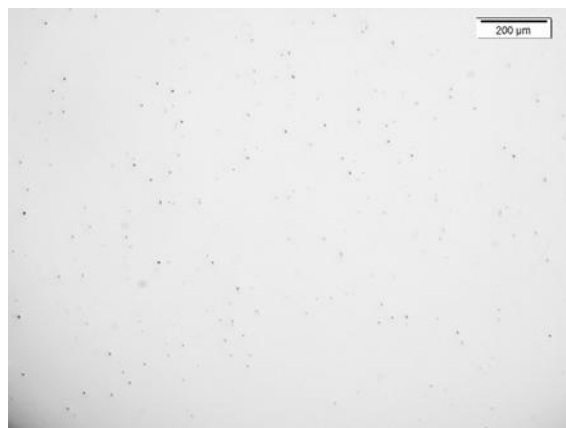
Este apéndice presenta los resultados detallados del análisis metalográfico realizado en especímenes metálicos como parte del estudio de caracterización de materiales. El análisis fue conducido en marzo de 2025 en los laboratorios de la Universidad Industrial de Santander, bajo la supervisión del Profesor Dario Peña.

El análisis de inclusiones no metálicas se realizó a 100X conforme a las normas ASTM E3 y ASTM E45 (método A). Se evidenciaron inclusiones de óxidos globulares (Tipo D) de la serie fina con nivel de severidad de 1,5 y de la serie gruesa con severidad de 0,5, como se muestra en la Figura 14.

EFECTO ELECTROQUÍMICO DEL INHIBIDOR NATURAL EN ACERO API N80 Q

Figura 14

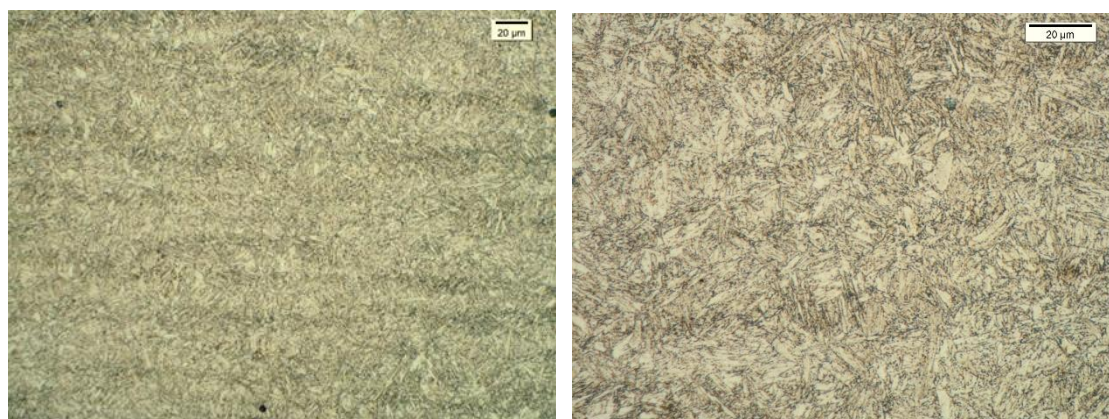
Micrografía sin ataque a 100X del espécimen en SL



La microestructura fue revelada mediante ataque químico por inmersión usando el reactivo Nital al 2%, según lo establecido en la norma ASTM E407. Para ambas secciones, longitudinal y transversal, se observó una microestructura constituida por martensita fina en listones, como se ilustra en las Figuras 15 y 16.

Figura 15

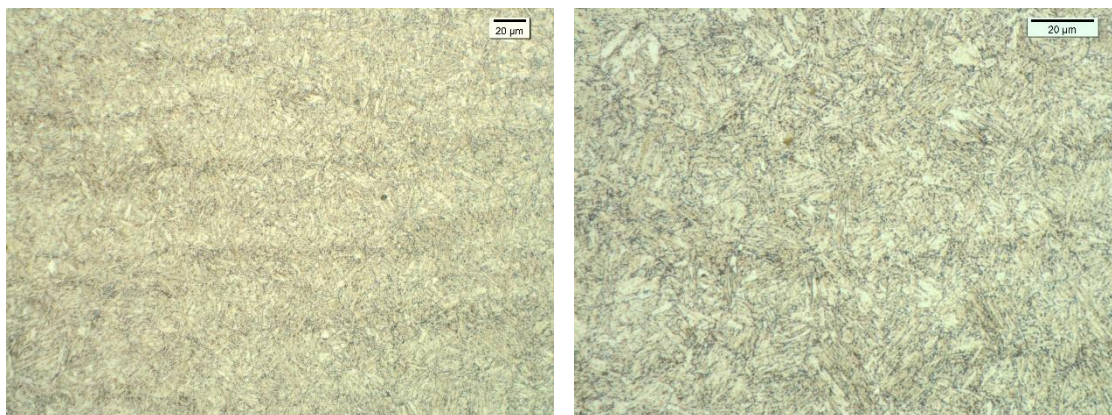
Micrografías a 500X y 1000X para la sección longitudinal, mostrando microestructura de martensita fina en listones



EFECTO ELECTROQUÍMICO DEL INHIBIDOR NATURAL EN ACERO API N80 Q

Figura 16

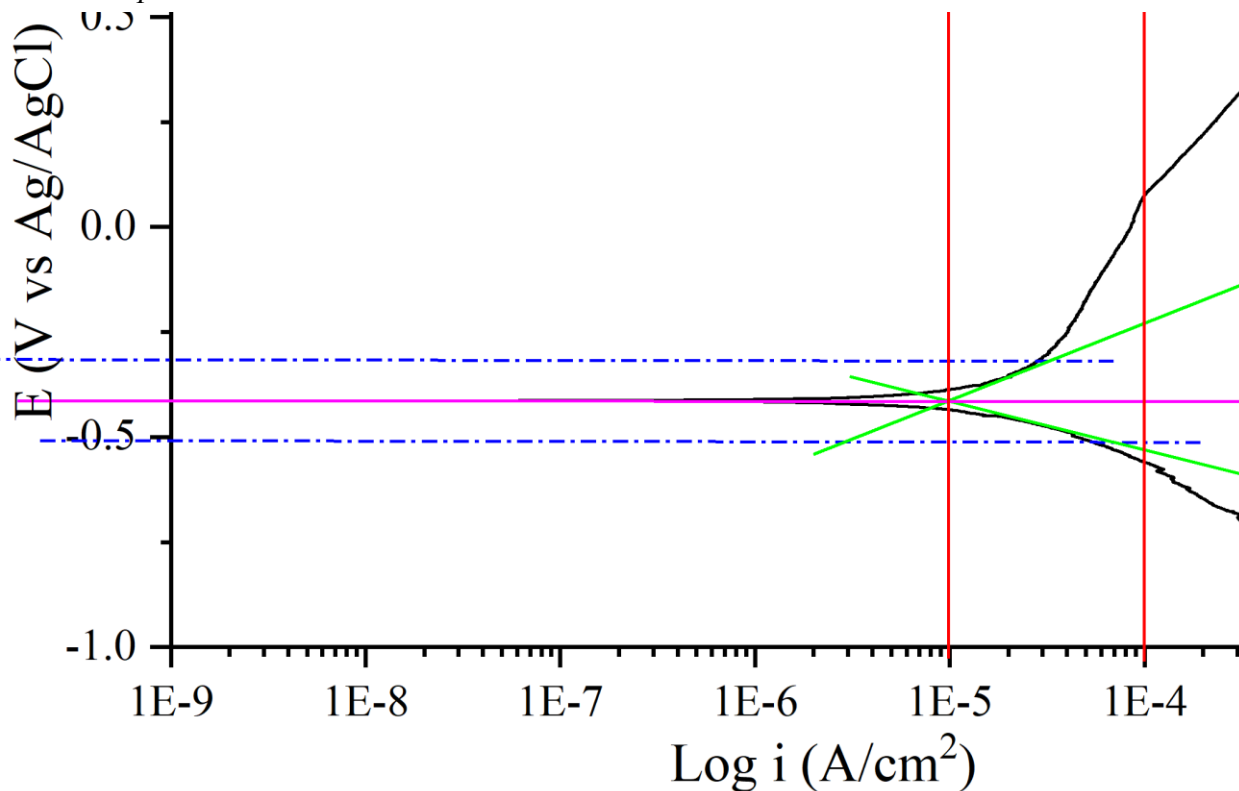
Micrografía a 500X y 1000X para la sección transversal, mostrando microestructura de martensita fina de listones

**Apéndice C.** Aplicación del método de extrapolación de Tafel en el software Origin

La figura 17, ilustra el procedimiento técnico empleado para analizar los datos de curva potenciodinámicas mediante extrapolación de Tafel, utilizando el software Origin. En este ejemplo se observa cómo se ajustaron las regiones lineales de las ramas anódicas y catódicas de la curva obtenida en el ensayo electroquímico, para determinar los parámetros clave: potencial de corrosión (E_{corr}), densidad de corriente (i_{cor}), coeficientes de pendientes anódicas β_a y pendiente catódicas β_c . Este procedimiento se aplicó de manera sistemática a cada concentración del inhibidor evaluada en el estudio, siguiendo el mismo protocolo experimental.

Figura 17

Proceso de extrapolación de Tafel mediante Origin para determinar parámetros electroquímicos en la curva potenciodinámica



Apéndice D. Fundamentos teóricos y ecuaciones de las técnicas electroquímicas utilizadas como: Curva potenciodinámica, Tafel y resistencia a la polarización.

Curva potenciodinámica

La curva potenciodinámicas son utilizadas para estudiar el comportamiento electroquímico del material en un rango amplio de potenciales (Gómez, 2016). En esta técnica se mide la corriente

EFFECTO ELECTROQUÍMICO DEL INHIBIDOR NATURAL EN ACERO API N80 Q

resultante en un rango de potenciales entre -1500 mV y +1500 mV con velocidades de barrido entre 0.6 V/h.

El comportamiento electroquímico está definido por la ley de Ohm:

$$V = RI \quad (\text{Ec.2})$$

Donde R se puede despejar como:

$$R = \frac{V}{I} \quad (\text{Ec.3})$$

Tafel

La ecuación de la Tafel es esencial para estudiar la cinética de reacciones electroquímicas en procesos de corrosión (i_{corr}) y las constantes de Tafel a partir de las curvas potenciodinámicas (Cáceres et al., 2019). La ecuación de Tafel relaciona el potencial y la corriente mediante la siguiente fórmula:

$$E = a + b \log(i) \quad (\text{Ec.4})$$

Donde:

- E es el potencial
- i es la corriente
- a es una constante relaciona con las condiciones del sistema
- b es la pendiente de Tafel, que proporciona información sobre la velocidad de corrosión y los mecanismos involucrados

EFFECTO ELECTROQUÍMICO DEL INHIBIDOR NATURAL EN ACERO API N80 Q

A partir de las curvas potenciodinámicas obtenidas, se realizó la extrapolación para determinar las constantes de Tafel anódica (b_a) y catódica (b_c), lo que permitió calcular la densidad de corriente de corrosión (i_{corr}). Las ecuaciones utilizadas para esta extrapolación son:

$$\log(i) = \log(i_{corr}) + \frac{E - E_{corr}}{b_a} \quad (\text{Ec.5})$$

$$\log(i) = \log(i_{corr}) + \frac{E - E_{corr}}{b_c} \quad (\text{Ec.6})$$

Para el cálculo de la densidad de corriente de corrosión, se aplica la siguiente formula:

$$i_{cor} = \frac{I_{cor}}{A} \quad (\text{Ec.7})$$

Donde:

- i_{cor} = Densidad de corriente de corrosión $\mu A/cm^2$
- I_{cor} = Corriente total anódica μA ,
- A = Área de muestra expuesta cm^2

Resistencia a la polarización (R_p)

Esta técnica electroquímica mide la resistencia eléctrica que presenta una corriente pequeña al fluir a través de una película de óxido o una capa de corrosión. Esta técnica se basa en la aplicación de una pequeña corriente alterna al sistema y la medición de la respuesta en términos de cambio de potencial (Suarez, 2018), para este estudio se aplicó una corriente alterna de 10 μA .

La resistencia a la polarización (R_p) se define mediante la ecuación de Stern-Geary:

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta I} = \frac{(\beta_a \beta_c)(2.3)(\beta_a + \beta_c)}{I_{cor}} \quad (\text{Ec.8})$$

EFECTO ELECTROQUÍMICO DEL INHIBIDOR NATURAL EN ACERO API N80 Q

Donde:

- β_a y β_c : Corresponden a los valores de la pendiente de Tafel para las reacciones anódicas y catódicas
- ΔE : Cambio de potencial aplicado
- ΔI : Resultante en la densidad de corriente

La constante de Tafel (B) se define como:

$$B = \frac{(\beta_a * \beta_c)}{(2.303)(\beta_a + \beta_c)} \quad (\text{Ec.9})$$

Y la resistencia a la polarización se expresa como:

$$Rp = \frac{B}{I_{cor}} \quad (\text{Ec.10})$$

Para el cálculo de la velocidad de corrosión, se utilizaron los valores de la Tabla 8, donde se encuentra el factor de conversión que relaciona la densidad de corriente de corrosión:

Tabla 9

Valores de constantes para su uso en la ecuación de Faraday.

A				
Penetration Rate Unit (CR)	I_{cor} Unit	ρ Unit	K_1	Units of K_1^A
mpy	$\mu\text{A}/\text{cm}^2$	g/cm^3	0.1288	mpy s $\text{g}/\mu\text{A cm}$
mm/yr^B	A/m^{2B}	kg/m^{3B}	327.2	mm s $\text{kg}/\text{A m y}$
mm/yr^B	$\mu\text{A}/\text{cm}^2$	g/cm^3	3.27×10^{-3}	mm s $\text{g}/\mu\text{A cm y}$
B				
Mass Loss Rate Unit	I_{cor} Unit	K_2	Units of K_2^A	
$\text{g}/\text{m}^2\text{d}^B$	A/m^{2B}	0.8953	g s/Ad	
$\text{mg}/\text{dm}^2\text{d}$ (mdd)	$\mu\text{A}/\text{cm}^2$	0.0895	$\text{mg s cm}^2/\mu\text{A dm}^2 \text{d}$	
$\text{mg}/\text{dm}^2\text{d}$ (mdd)	A/m^{2B}	8.953	$\text{mg s m}^2/\text{A dm}^2 \text{d}$	

Nota: Adaptado de (Sociedad Americana para Ensayos y Materiales, 2023)

La fórmula de velocidad de corrosión, usando la ley de Faraday, se expresa como:

EFECTO ELECTROQUÍMICO DEL INHIBIDOR NATURAL EN ACERO API N80 Q

$$CR = K_1 \frac{i_{cor}}{\rho} * EW \quad (\text{Ec.11})$$

Donde:

- K_1 = Valor constante de la Tabla 8
- CR = Tasa de corrosión (mm/año)
- i_{cor} = Densidad de corriente ($\mu A/cm^2$)
- EW = Peso equivalente de la muestra
- ρ = Densidad del material