

Revisión Del Estado Del Arte De La Posible Capacidad Inhibidora Del Extracto De Biomasa Residual De Limón Para Mitigar La Corrosión En Tuberías De Acero API N80.

Ledis Dayana Patiño Rodríguez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniera Metalúrgica

Director

Dario Yesid Peña B.

PhD en Corrosión

Codirector

Ing. M.Sc Juan C. Orozco A.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales

Ingeniería Metalúrgica

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

A mi hermano David, por creer siempre en mí y brindarme su apoyo incondicional.

A mi madre, Aurorita, gracias por entregarlo todo y hacer posible este logro.

A Silvia, la mejor amiga que me regaló la universidad, gracias por tu compañía y por estar en cada momento importante.

A Elkin, Camilo e Ingrid, quienes fueron y seguirán siendo los mejores compañeros que la vida me pudo dar.

A Jessid, gracias por acompañarme en este camino con paciencia, cariño y fe en mí.

Agradecimientos

A mi director de tesis, profe Darío, gracias por tu paciencia, por tu tiempo y por acompañarme con dedicación en cada paso de este proceso.

Al profe Ángel Meléndez, gracias por creer en mí y recordarme siempre el valor de mi esfuerzo como ingeniera.

A la Escuela de Ingeniería Metalúrgica, gracias por dar lo mejor de ustedes; aquí no solo se forman profesionales, también se forman seres humanos con valores y compromiso, y me siento orgullosa de haber hecho parte de esta casa.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	
1. Objetivos.....	11
1.1 Objetivo General.....	11
1.2 Objetivos Específicos.....	11
2. Justificación	11
3. Metodología	13
4. Marco conceptual.....	14
5. Análisis bibliométrico (análisis de bibliografías consultada).....	18
Concentración del inhibidor.....	19
Tiempo de exposición.....	22
Temperatura del inhibidor.....	25
Sostenibilidad.....	29
7. Conclusiones.....	34
Referencias Bibliográficas	

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Parámetros potencio dinámicos para acero al carbono en agua de formación en concentración de 2,5% extracto de cascara en un rango de temperatura (25-55°C).....	26
Tabla 2. Velocidad de corrosión y eficiencia del inhibidor medida por el método de pérdida de masa a diferentes temperaturas.	28
Tabla 3. Composición y fuente de D-limonene	31
Tabla 4. Resultados del análisis económico del proceso de producción de carbonato de polilimoneno	32

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Diagrama de Pourbaix.....	16
Figura 2. Curvas potenciodinámicas en HCl y evaluadas durante 24 días.	18
Figura 3.. Curva Potencio dinámica de acero dulce en HCl.	20
Figura 4. Curvas de potencio-dinámicas de acero API N80 24h de inmersión en H ₂ SO ₄ (a) PHA- CDs (b) PCA-CDs (c) PDA-CDs.....	21
Figura 5. (a) Eficiencia del inhibidor en acero N80 (b) Velocidad de corrosión de GSE en 1M de HCl a 30°C en acero API N80.	23
Figura 6. Variación de la eficiencia del inhibidor con diferentes tiempos de inmersión 1M HCl en acero dulce..	24
Figura 7. Variación de la eficiencia del inhibidor con diferentes temperaturas 1M HCl en acero dulce.....	24
Figura 8. Curvas potencio-dinámicas de un acero al carbono en agua de formación (a) varias concentraciones de extracto de cascara de naranja a 25°C. (b) Sin inhibidor en un rango de 25- 55°C. (c) Inhibidor al 2.5% en un rango de 25-55°C.	27

Glosario

Adsorción: dicho de un cuerpo, atraer y retener en su superficie moléculas o iones de otro cuerpo.

API N80: tubería de acero para pozos petrolíferos fabricada según las especificaciones de grado N80 del estándar API 5CT.

Bacterias sulfato reductoras: microorganismos anaeróbicos que usan el sulfato como aceptor final de electrones para obtener energía, produciendo sulfuro de hidrógeno H₂S.

Biomasa residual de limón: desechos orgánicos provenientes del cultivo del limón.

Concentración: magnitud que expresa la cantidad de una sustancia por unidad de volumen, y cuya unidad en el sistema internacional es el mol por metro cúbico (mol/m³).

Corrosión microbiológica: proceso de deterioro electroquímico que causa la degradación de metales debido a la actividad metabólica de microorganismos como bacterias, hongos y algas.

Corrosión: desgaste paulatino de los cuerpos metálicos por acción de agentes externos, persista o no su forma.

Curvas potencia dinámicas: representación gráfica del potencial de un electrodo versus la densidad de corriente, que se usa en electroquímica para investigar la corrosión de materiales.

Diagrama de Pourbaix: representación gráfica del potencial en función del pH para un metal dado bajo condiciones termodinámicas standard.

D-Limonene: Es un terpeno natural presente en las frutas cítricas.

Economía circular: modelo de producción y consumo que busca minimizar los residuos y aprovechar al máximo los recursos al extender el ciclo de vida.

Fisisorción: proceso físico donde las moléculas de un gas o líquido se adhieren débilmente a la superficie de un sólido, principalmente por fuerzas de Van der Waals.

Fitoquímicos: compuestos bioactivos naturales presentes en las plantas que les aportan color, sabor y aroma, al actuar como antioxidantes.

Inhibidor verde: es un tipo de agente químico, derivado de fuentes naturales y biodegradable, que se utiliza para retardar o prevenir la corrosión de metales de manera ecológica y no tóxica.

Inhibidor: cualquier agente, ya sea una sustancia química o un dispositivo electrónico, que tiene la capacidad de ralentizar, detener o impedir una reacción o proceso.

Inhibidores químicos: sustancias químicas con la capacidad de retardar, disminuir o prevenir el proceso oxidativo.

Inhibidores sintéticos: molécula artificial creada en un laboratorio que reduce o detiene una reacción química o un proceso biológico específico.

Integridad de metal: capacidad para mantener sus propiedades estructurales y funcionales a lo largo del tiempo, resistiendo deformaciones, daños o fallas.

Nanopartículas: partículas extremadamente pequeñas, generalmente con dimensiones entre 1 y 100 nanómetros, que son invisibles a simple vista y los materiales a nivel atómico.

Nucleación: proceso inicial en una transformación de fase, donde se forma un núcleo de una fase más estable en el seno de una fase metaestable, como la condensación o la cristalización.

Pasivo: es aquel que se recubre de forma natural o intencional con una capa de óxido protectora que le otorga una gran resistencia a la corrosión, volviéndolo químicamente inerte.

pH: índice que expresa el grado de acidez o alcalinidad de una disolución.

Rutaceae: las rutáceas son una familia de plantas angiospermas perteneciente al orden Sapindales, compuesta por rudas, cítricos, entre otros.

Resumen

Título: Revisión del estado del arte de la posible capacidad inhibidora del extracto de biomasa residual de limón para mitigar la corrosión en tuberías de acero API N80.*

Autor: Ledis Dayana Patiño Rodríguez**

Palabras Clave: corrosión, inhibidores verdes, n80, inhibidores de corrosión.

Descripción: La corrosión constituye un problema crítico para diversas industrias, en especial la petrolera, donde compromete la integridad de materiales y sistemas de transporte. Una de las estrategias más empleadas para mitigar este fenómeno es el uso de inhibidores de corrosión; sin embargo, muchos de ellos presentan limitaciones relacionadas con su toxicidad y elevados costos, lo que restringe su sostenibilidad a largo plazo. En este contexto, el presente trabajo evalúa el potencial inhibidor de la biomasa residual de limón, con especial énfasis en el aceite esencial D-limoneno y la pectina. Los resultados reportados en medios ácidos evidencian eficiencias de inhibición superiores al 80 %, confirmando su capacidad para proteger aceros como el API N80. Asimismo, se destaca que el D-limoneno resulta aproximadamente 1,5 veces más económico que el inhibidor comercial THPS, ampliamente utilizado en la industria petrolera, lo que refuerza su viabilidad técnica, económica y ambiental como una alternativa verde en el control de la corrosión.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Programa académico. Director: Dario Yesid Peña Ballesteros. PhD en Corrosión. Codirector: Ing. M.Sc Juan C. Orozco A.

Abstract

Title: Review of the potential inhibitory ability of residual lemon biomass extract to mitigate corrosion in API N80 steel pipes*

Author(s): Ledis Dayana Patiño Rodríguez**

Key Words: corrosion, green inhibitors, n80, inhibitors corrosion

Description: Corrosion represents a critical challenge across various industries, particularly in the petroleum sector, where it compromises the integrity of materials and transportation systems. One of the most widely adopted strategies to mitigate this phenomenon is the use of corrosion inhibitors; however, many of these compounds face limitations related to their toxicity and high costs, which constrain their long-term sustainability. In this context, the present study evaluates the inhibitory potential of lemon residual biomass, with particular emphasis on the essential oil D-limonene and pectin. Results reported in acidic media demonstrate inhibition efficiencies exceeding 80%, thereby confirming their ability to protect steels such as API N80. Furthermore, it is noteworthy that D-limonene is approximately 1.5 times more cost-effective than the commercial inhibitor THPS, which is widely employed in the petroleum industry. This finding underscores its technical, economic, and environmental viability as a green alternative for corrosion control.

* Degree Work

** Faculty of Physicochemical Engineering, School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Academic Program. Director: Dario Yesid Peña Ballesteros. PhD in Corrosion. Codirector: Ing. M.Sc Juan C. Orozco A.

Introducción

La corrosión es un problema significativo en diversas industrias, especialmente en aquellas que utilizan acero, uno de los materiales más empleados a nivel global. En las industrias petroleras y de transporte se utilizan inhibidores de corrosión sintéticos; sin embargo, Sowmyashree et al. (2023) afirma que estos presentan varios desafíos, como la toxicidad de los productos, dificultades en su fabricación, gestión de residuos y contaminación ambiental. Estos problemas subrayan la necesidad de buscar alternativas sostenibles y respetuosas con el medio ambiente, sin perder de vista la viabilidad económica de las soluciones propuestas.

Diversos estudios realizados (Marzorati et al. 2018) con algas, hojas y extractos de plantas han mostrado resultados positivos en su uso como inhibidores de corrosión. Sin embargo, también existen residuos orgánicos provenientes de otras industrias que podrían aprovecharse por sus propiedades, ofreciendo así una alternativa ecológica. Rodríguez et al. (2020) recalca que esto no solo presentaría una opción amigable con el medio ambiente, sino que también contribuiría al manejo y reutilización de residuos orgánicos en el control de la corrosión.

La revisión de Najem et al. (2024) sobre los constituyentes presentes en los desechos o residuos de frutas resulta fundamental para identificar los compuestos activos con potencial como inhibidores de corrosión. En el caso del limón (*Citrus limetta*), perteneciente a la familia Rutaceae, se caracterizó su cáscara, encontrando que el componente mayoritario corresponde al D-limoneno, con una proporción del 95 % Sowmyashree et al. (2023). Asimismo, Eddy et al. (2023) evaluó los constituyentes fitoquímicos presentes en residuos como cáscaras, cortezas y semillas que han sido objeto de evaluación respecto a su eficacia inhibidora.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Análisis bibliográfico de la inhibición de un extracto de limón como posible inhibidor de la corrosión de un acero API N80.

1.2 Objetivos Específicos

Identificar los compuestos activos presentes en la biomasa residual de limón que puedan tener propiedades inhibidoras de la corrosión.

Estudiar el efecto de variables operativas como concentración del inhibidor, tiempo de exposición y temperatura sobre la eficiencia del extracto en un acero API N80.

Evaluar la sostenibilidad del uso del extracto de biomasa residual de limón en términos de impacto ambiental y costo en comparación con inhibidores sintéticos.

2. Justificación

El uso de aceros en la industria, especialmente en la fabricación de tuberías para oleoductos y gasoductos, es fundamental debido a su resistencia mecánica y a su capacidad para cumplir con las exigencias operativas del sector. La calidad de estos materiales se encuentra regulada por normativas internacionales, como las establecidas por el American Petroleum Institute (API), que garantizan el cumplimiento de estándares técnicos y de seguridad. No obstante, uno de los principales retos que enfrentan estas estructuras es la corrosión, un fenómeno natural que compromete la integridad de los metales y que puede acelerarse o ralentizarse dependiendo de las condiciones del entorno.

Dentro de las estrategias para mitigar la corrosión, los inhibidores químicos han adquirido relevancia, destacándose los compuestos orgánicos por su efectividad en medios ácidos. Su acción protectora se basa en la formación de una película adsorbida sobre la superficie metálica, que reduce significativamente el deterioro del material (Yeganeh et al., 2025). En este contexto, la biomasa residual de limón representa una alternativa sostenible, dado que sus extractos contienen una amplia gama de fitoquímicos, entre ellos limoneno, flavonoides, xantofilas, carotenoides, antocianinas, compuestos polifenólicos y ácido ascórbico, capaces de actuar como inhibidores de corrosión y de participar en procesos de síntesis de nanopartículas (Elizondo-Villarreal et al., 2022).

En particular, Elizondo-Villarreal et al., 2022 afirma que el D-limoneno, presente en aproximadamente un 78 % en la cáscara de *Citrus volkameriana*, ha demostrado ser un tensioactivo verde con capacidad para influir en la nucleación y el crecimiento de nanopartículas, como las de Fe_3O_4 , y desempeñar un rol activo como potenciador del inhibidor de corrosión. Esto evidencia que los residuos de limón no solo pueden emplearse directamente como inhibidores gracias a sus compuestos activos, sino que también contribuyen al desarrollo y optimización de inhibidores sintéticos.

Adicionalmente, Unsal et al., 2022 ha comprobado la compatibilidad del D-limoneno con inhibidores comerciales, mejorando su eficacia cuando se combina con agentes biocidas como el THPS (tetrakis hydroxymethyl phosphonium sulfate). Estudios recientes muestran que, aunque el D-limoneno a 100 ppm tiene un efecto inhibidor significativo, por sí solo no controla eficazmente a bacterias como las sulfato-reductoras (SRB). La adición de THPS permite reducir de forma considerable el recuento de estas bacterias, optimizando la protección del acero frente a la corrosión microbiana y mejorando la eficiencia global del sistema inhibidor.

En consecuencia, el presente estudio se justifica por la necesidad de evaluar el potencial de la biomasa residual de limón como inhibidor de corrosión para acero API N80, combinando criterios de sostenibilidad, eficiencia y compatibilidad con agentes comerciales, en respuesta a los desafíos ambientales y económicos de la industria petrolera.

3. Metodología

El análisis bibliográfico de la inhibición de un extracto de limón como posible inhibidor de la corrosión de un acero API N80 se desarrolló a partir de una revisión bibliográfica exhaustiva en bases de datos científicas como ScienceDirect, SpringerLink, MDPI, Google Scholar. Se emplearon palabras clave relacionadas con inhibidores de corrosión verdes, biomasa residual, D-limoneno y aceros API N80, seleccionando principalmente artículos publicados entre 2018 y 2025 que aportaran información experimental, comparativa y de sostenibilidad.

La información recopilada se estructuró priorizando el análisis de los mecanismos de acción de los inhibidores naturales y su aplicabilidad en aceros API N80. Así mismo, se revisaron estudios de caso enfocados en el aprovechamiento de residuos cítricos como fuente de compuestos bioactivos, destacando el limón y su principal componente, el D-limoneno. A partir de esta revisión fue posible identificar patrones comunes relacionados con la eficiencia de los inhibidores, los procesos de adsorción y la influencia de factores ambientales como la temperatura, la concentración del inhibidor y el tiempo de exposición, los cuales resultan determinantes en su efectividad.

Finalmente, se realizó la comparación de los inhibidores naturales frente a los sintéticos. Para ello, se analizaron parámetros como porcentaje de eficiencia, costos asociados, con el fin de

discutir su aplicabilidad industrial y el potencial de los inhibidores verdes como alternativa sostenible en la protección de aceros utilizados en la industria petrolera.

4. Marco conceptual

Los inhibidores de corrosión han sido empleados en la industria desde el siglo XX, surgiendo como una necesidad para proteger las estructuras metálicas que se degradan rápidamente bajo condiciones ambientales adversas. Su aplicación resultó especialmente relevante en sectores de gran impacto, como el petrolero. No obstante, la toxicidad de muchos de estos compuestos convencionales ha generado cuestionamientos en torno a su uso, lo que ha impulsado la búsqueda de alternativas que no solo mantengan la eficacia en la protección del acero, sino que también sean seguras para el medio ambiente y viables en términos de recursos disponibles (Marzorati et al., 2018).

El mecanismo de acción de los inhibidores de corrosión puede explicarse a través de diferentes procesos. Madrid et al. (2024) afirma que entre los más relevantes se encuentran la formación de una capa protectora sobre la superficie del metal para la inhibición de las reacciones electroquímicas responsables del deterioro y la disminución en la transferencia de sustancias corrosivas desde el ambiente hacia el metal. Adicionalmente, muchos inhibidores presentan estructuras basadas en aminoalcoholes y ésteres con grupos hidrofóbicos, en los que intervienen elementos como nitrógeno (N), azufre (S) e hidroxilos (OH^-). Su acción protectora se produce principalmente por procesos de adsorción sobre la superficie metálica, lo que disminuye la velocidad de las reacciones de corrosión.

El mecanismo de inhibición de inhibidores verdes según Geethamani et al. (2018) se basa en la adsorción de moléculas orgánicas sobre la superficie metálica, lo que genera una película protectora que disminuye la disolución del metal en medios agresivos. Este proceso depende de la carga y naturaleza del metal, así como de la estructura química del inhibidor, y está influenciado por el campo eléctrico en la interfaz metal-electrolito. Para su estudio, se emplean isotermas de adsorción como las de Langmuir, Frumkin, Temkin, Flory-Huggins y Bockris-Swinkels, que permiten comprender el tipo de interacción y la estabilidad de la capa formada.

Según Ouadi et al. (2020) la fisisorción en inhibición de la corrosión se explica como la interacción electrostática entre las moléculas del inhibidor y la superficie metálica cargada. La eficacia del proceso depende de la persistencia y estabilidad de la capa protectora formada, aunque una interacción demasiado fuerte no siempre garantiza una mejor inhibición, pues puede favorecer la disolución del metal, como ocurre con los iones cloruro que intensifican la corrosión pese a su fuerte unión. Por ello, el inhibidor debe adsorberse con suficiente fuerza para permanecer en la superficie sin comprometer la estabilidad metálica. Kokalj (2021) afirma que el tipo de adsorción suele evaluarse mediante la energía libre estándar de adsorción: valores cercanos a 20 kJ/mol corresponden a fisisorción, mientras que valores en torno a 40 kJ/mol se asocian a quimisorción.

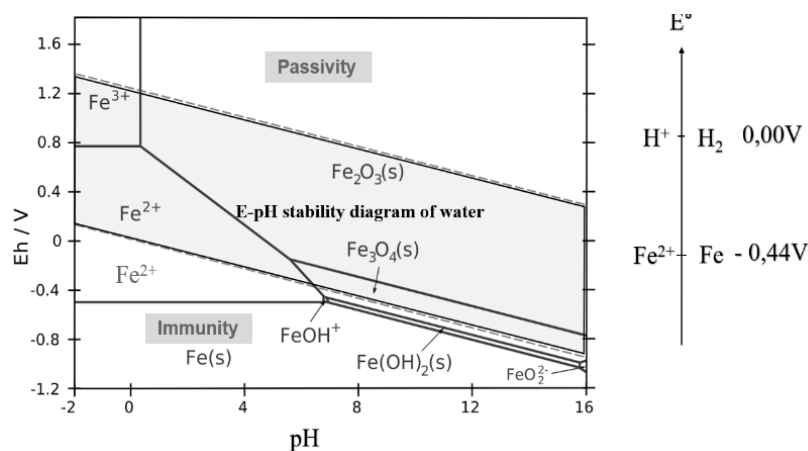
La selección de un material adecuado, en función de su aplicación y diseño final, constituye el primer paso para prevenir o mitigar la aparición de corrosión. En donde, la elección del inhibidor está directamente relacionada con la naturaleza del material metálico y con las condiciones específicas de exposición a las que será sometido. Parangusan et al., 2024 realiza los diversos componentes fitoquímicos, como alcaloides, flavonoides, esteroides, terpenoides y aminoácidos, que han demostrado un alto potencial como inhibidores naturales de la corrosión, ofreciendo alternativas más sostenibles frente a los compuestos sintéticos tradicionales. Asimismo, resulta

esencial controlar parámetros ambientales como el pH, la temperatura y la presencia de especies reactivas, ya que estos factores influyen de manera determinante en la efectividad y desempeño de los inhibidores.

Una herramienta clave para complementar el análisis de los fenómenos de corrosión es el diagrama de Pourbaix, que permite establecer las condiciones de estabilidad de un metal en función del pH del medio y del potencial electroquímico aplicado. Este diagrama identifica regiones de inmunidad, pasividad o susceptibilidad a la corrosión, dependiendo de las condiciones del entorno. Así, según el potencial y los factores ambientales, es posible predecir si el metal tenderá a corroerse, mantenerse pasivo mediante la formación de una película protectora, o permanecer estable (Loukili et al., 2022).

Figura 1.

Diagrama de Pourbaix.



Nota. * Diagrama de Pourbaix. Tomado de “View of Corrosion Inhibition using Green Inhibitors: An Overview. 2022”

Las biomásas residuales provenientes de la industria alimentaria representan una alternativa prometedora para la mitigación de la corrosión, dado que diferentes tipos de residuos han demostrado eficacia en la inhibición de este fenómeno en distintos medios y aceros. La biomasa residual de limón, derivada del género *Citrus* una de las subunidades taxonómicas más relevantes de la familia Rutaceae adquiere un papel fundamental. Klimek-Szczykutowicz et al. (2020) afirma que los cítricos ampliamente reconocidos por sus propiedades nutricionales, farmacéuticas y cosméticas, incluyen especies de gran importancia económica como *Citrus aurantium* (naranja amarga), *Citrus sinensis* (naranja dulce), *Citrus reticulata* (mandarina) y *Citrus paradisi* (toronja), siendo el limón (*Citrus limón*) una de las más destacadas. El aceite esencial de *C. limon*, está constituido mayoritariamente por monoterpenoides, entre los que sobresalen el D-limoneno (69,9 %), β -pineno (11,2 %), γ -terpineno (8,21 %), sabineno (3,9 %), mirceno (3,1 %), geranial o E-citral (2,9 %), neral o Z-citral (1,5 %) y linalool (1,41 %). Además, contiene compuestos como furanocumarinas lineales y flavonas polimetoxiladas, los cuales amplían sus posibles aplicaciones tanto en el ámbito científico como en el industrial.

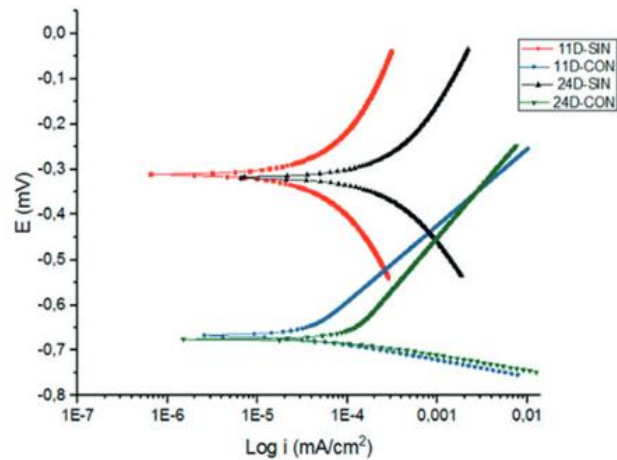
No obstante, a partir de la revisión de la literatura se evidenció que existen limitadas fuentes que aborden específicamente el uso de inhibidores de corrosión verdes derivados de biomasa residual de limón aplicados al acero API N80. Por esta razón, el análisis se complementó considerando estudios realizados en aceros dulces y aceros al carbono expuestos a medios ácidos, los cuales presentan comportamientos electroquímicos comparables. Además, las pocas fuentes confiables disponibles aportaron información relevante sobre inhibidores formulados con compuestos también presentes en la biomasa residual de limón, lo que permite establecer la aplicabilidad y pertinencia del presente estudio.

5. Análisis bibliométrico (análisis de bibliografías consultada)

En los últimos años se han desarrollado inhibidores de corrosión “verdes”, obtenidos a partir de diversas fuentes naturales como polvos, aceites, infusiones, extractos de plantas, cáscaras, semillas, hojas, raíces y biomasa residual de frutas. Estos compuestos no solo responden a la necesidad de reducir los impactos tóxicos de los inhibidores sintéticos, sino que además aprovechan materias primas de bajo costo y alta disponibilidad. Un ejemplo destacado es el trabajo de Rodríguez et al. (2020), quienes reportaron una eficiencia inhibidora del 94 % en un sistema elaborado a partir de cáscara de sandía, aplicado en un medio salino sobre acero A36, evidenciando el potencial de estas alternativas en aplicaciones industriales.

Figura 2.

Curvas potenciodinámicas en HCl y evaluadas durante 24 días.



Nota. * Curvas potenciodinámicas en HCl y evaluadas durante 24 días. Tomado de “). Eficiencia de un inhibidor verde extraído de la cáscara de la sandía en la corrosión del acero estructural A36 evaluado en medios ácido y salino. 2020”

La efectividad del proceso inhibidor en la reducción del avance de la corrosión se identifica en la Figura 2, donde se presenta el comportamiento del acero en un medio ácido, a partir de muestras evaluadas tras 11 y 24 días de exposición. Los resultados muestran un desplazamiento del potencial de corrosión hacia valores más pasivos, acompañado de una disminución en la velocidad de corrosión (densidad de corriente), lo que se evidencia en el traslado de la curva hacia abajo (Rodríguez et al., 2020).

Wong-Paz et al. (2020) indica que las frutas cítricas, como la lima, la naranja, la toronja y el limón, representan una fuente natural de compuestos de alto valor nutricional y funcional, entre los que destacan el ácido ascórbico, el ácido fólico, el potasio y diversos compuestos fenólicos. Estos componentes se asocian con múltiples actividades biológicas, siendo relevante su acción antioxidante. Entre los principales compuestos bioactivos presentes en los cítricos se encuentran los flavonoides, flavonoles, antocianinas, flavonas, flavanonas, carotenoides, cumarinas y limonoides. Particularmente, dentro del grupo de los flavonoides se han identificado moléculas de interés como la hesperidina, narirutina, naringina, eriocitrina, diosmina y limetina, las cuales han demostrado un amplio potencial tanto en el ámbito de la salud como en aplicaciones tecnológicas.

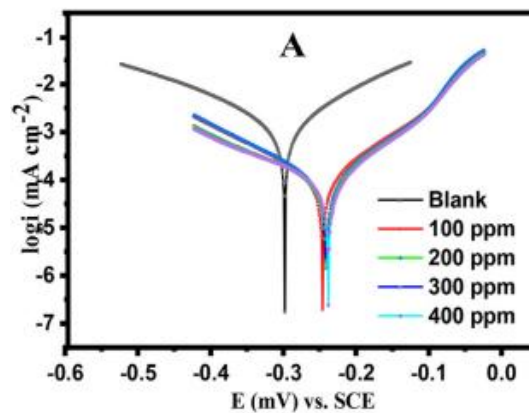
Concentración del inhibidor

El *Citrus limetta* (CL) es una de las especies más relevantes de la familia Rutaceae, grupo al que pertenecen los cítricos, y se caracteriza por su elevado contenido de terpenos, en particular D-limoneno/ciclotérpeno, que representa aproximadamente el 95 % de su composición, además

de incluir pigmentos, compuestos oxigenados y ceras. Según Sowmyashree et al. (2023), el extracto de cáscara de limón ha demostrado una eficacia de inhibición de la corrosión del 93 % en acero dulce expuesto a un medio de ácido clorhídrico, un valor alto en comparación con otros inhibidores reportados. Esta actividad se atribuye principalmente a la presencia de D-limoneno como componente mayoritario del extracto.

Figura 3.

Curva Potencio dinámica de acero dulce en HCl.



*Nota.** Curva Potencio dinámica de acero dulce en HCl. Tomado de “Potential sustainable electrochemical corrosion inhibition study of Citrus limetta on mild steel surface in aggressive acidic media. 2023”

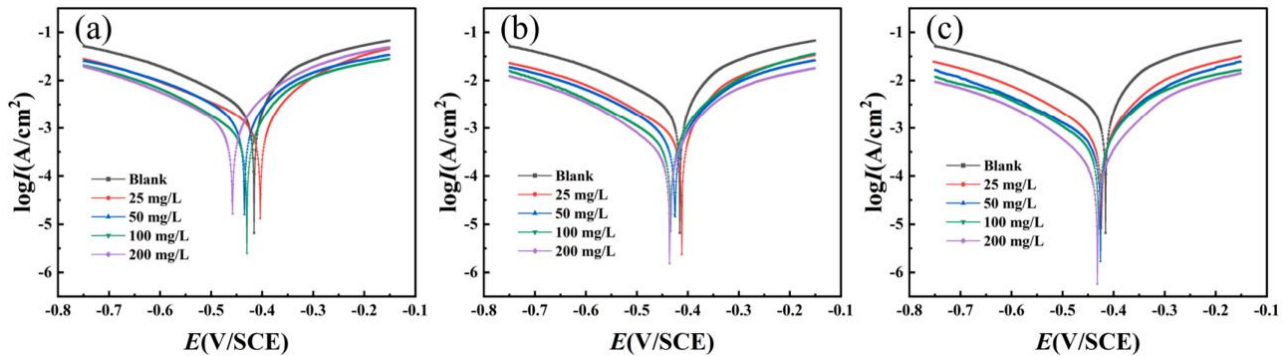
Al incrementar la concentración del inhibidor, las curvas potencio-dinámicas se desplazan hacia valores menores de densidad de corriente, lo que evidencia una reducción en la velocidad de corrosión. Este comportamiento es consistente con la relación establecida por la ecuación de Faraday (1) para el cálculo de la tasa de corrosión. De acuerdo con Wu et al. (2024) el aprovechamiento de los compuestos presentes en los cítricos ha mostrado un notable potencial

inhibidor como la pectina, principal componente de los residuos cítricos. A partir de esta se han sintetizado compuestos nitrogenados con el objetivo de evaluar su capacidad como inhibidores de corrosión. En dicho proceso se emplean aminas orgánicas como la 1-hexilamina (PHA-CDs), el 1,2-diaminociclohexano (PCA-CDs) y la dietilentriamina (PDA-CDs)., estos derivados presentan una efectividad significativa en acero API N80, confirmando su aplicabilidad en entornos industriales. Tal como se observa en la Figura 4, lo que respalda la eficacia de los inhibidores derivados de pectina como una alternativa verde y funcional.

$$CR = \frac{K \cdot I_{corr} \cdot EW}{\rho} \quad (1)$$

Figura 4.

Curvas de potencio-dinámicas de acero API N80 24h de inmersión en H_2SO_4 (a) PHA-CDs (b) PCA-CDs (c) PDA-CDs.



Nota. * Curvas de potencio-dinámicas de acero API N80 24h de inmersión en H_2SO_4 (a) PHA-CDs (b) PCA-CDs (c) PDA-CDs. Tomado de “Pectin-derived nitrogen-doped carbon dots as green corrosion inhibitors for N80 steel in 1 M sulfuric acid solution. 2024”

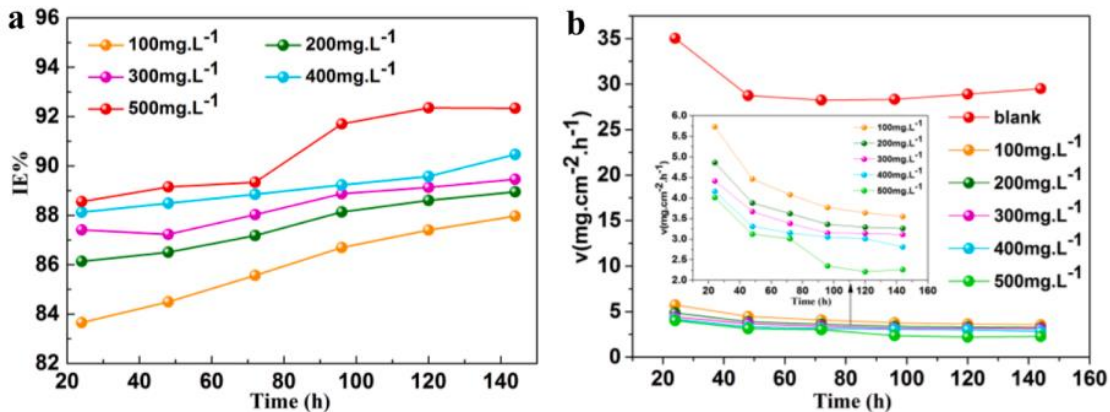
Finalmente, a mayor concentración del inhibidor, se alcanza una mayor efectividad frente a la corrosión. Esto se evidencia en el estudio de Wu et al. (2024), donde se evaluó tres aminas derivadas de pectina (PHA-CD, PCA-CD y PDA-CD), obteniendo eficiencias máximas de inhibición del 75,3 %, 90,1 % y 95,4 %, respectivamente. De manera complementaria, Sowmyashree et al. (2023) reportó un comportamiento análogo en el caso del Citrus limetta, alcanzando eficiencias de inhibición del 90,38 %, 91,55 %, 92,71 % y 93,91 % para concentraciones de 100 ppm, 200 ppm, 300 ppm y 400 ppm, respectivamente.

Tiempo de exposición

Tu et al. (2024) analizó el desempeño del inhibidor en función del tiempo y la temperatura, observándose que la eficiencia de inhibición aumenta progresivamente con el paso del tiempo, mientras que la velocidad de corrosión disminuye de manera constante. Este comportamiento, aunque con incrementos de eficiencia no siempre significativos, se atribuye al efecto de estabilización de la película protectora, cuya formación y adhesión sobre la superficie reduce la corrosión. El análisis se realizó en el extracto de la planta Gleditsia, originaria de Asia y caracterizada por su alto contenido de flavonoides y terpenos, se evaluaron las variables de tiempo y temperatura, considerando que estos compuestos bioactivos también están presentes en los residuos de limón.

Figura 5.

(a) Eficiencia del inhibidor en acero N80 (b) Velocidad de corrosión de GSE en 1M de HCl a 30°C en acero API N80.



Nota. * (a) Eficiencia del inhibidor en acero N80 (b) Velocidad de corrosión de GSE en 1M de HCl a 30°C en acero API N80. Tomado de “Gleditsia sinensis extract as green corrosion inhibitor for N80 steel in 1 M HCl. Journal of Molecular Structure. 2024”

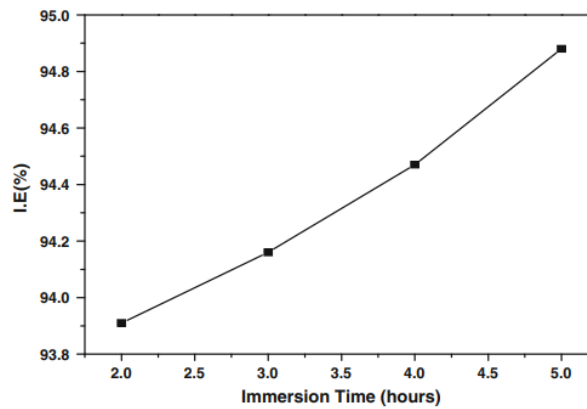
El tiempo de exposición resulta un factor clave en la evaluación del desempeño del inhibidor, donde se evidencia que a mayor tiempo aumenta la eficiencia. Este incremento puede atribuirse a la estabilidad y persistencia de la película protectora adsorbida sobre la superficie metálica, en concordancia con Gopiraman et al. (2011) y Tu et al. (2024).

Los grupos funcionales presentes en diversos compuestos derivados de biomazas residuales poseen anillos aromáticos y heterocíclicos, junto con heteroátomos ricos en electrones como nitrógeno (N), azufre (S) y oxígeno (O), que favorecen la interacción con la superficie metálica. De esta manera, contribuyen a la formación de una capa protectora que aísla al metal frente a la acción de agentes corrosivos. En este contexto, la presencia de compuestos como la 2,3-

dihidroxi flavanona resulta fundamental, ya que presenta un modelo de adsorción adecuado y protege el metal en función del tiempo (Gopiraman et al. 2011).

Figura 6.

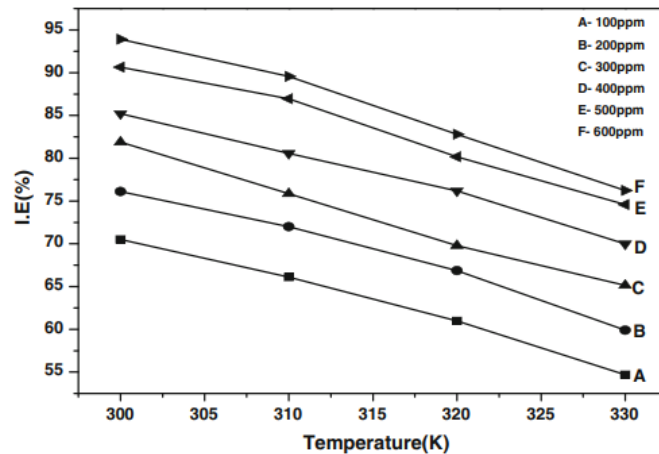
Variación de la eficiencia del inhibidor con diferentes tiempos de inmersión 1M HCl en acero dulce.



Nota. Variación de la eficiencia del inhibidor con diferentes tiempos de inmersión 1M HCl en acero dulce. Tomado de “Influence of 2,3-Dihydroxyflavanone on corrosion inhibition of mild steel in acidic medium. 2011”*

Figura 7.

Variación de la eficiencia del inhibidor con diferentes temperaturas 1M HCl en acero dulce.



Nota. * Variación de la eficiencia del inhibidor con diferentes temperaturas 1M HCl en acero dulce. Tomado de “Influence of 2,3-Dihydroxyflavanone on corrosion inhibition of mild steel in acidic medium. 2011”

La influencia de la temperatura tiene efecto inverso a la eficiencia del inhibidor, en donde, observándose una mayor eficiencia de inhibición a 300 K. Según Gopiraman et al. (2011) este comportamiento indica que el mecanismo de adsorción del inhibidor está asociado principalmente a la fisisorción, caracterizada por interacciones débiles de Van der Waals que tienden a perder estabilidad a temperaturas elevadas.

Temperatura del inhibidor

En aceros al carbono se han estudiado las propiedades inhibidoras de la cáscara de naranja, la cual constituye una fuente rica en compuestos bioactivos como pectina, hesperidina, polifenoles, carotenoides y vitaminas. Estos compuestos contienen heteroátomos, principalmente oxígeno (O) y nitrógeno (N), que facilitan los procesos de adsorción sobre la superficie metálica y contribuyen a la reducción de la velocidad de corrosión. Según Elazabawy et al. (2023), el comportamiento de la cáscara de naranja como inhibidor en función de la concentración y la temperatura evidencian

que, al incrementar la temperatura, la capacidad inhibidora disminuye debido a que la película protectora tiende a difundirse hacia la solución y se reduce la adsorción sobre la superficie del metal.

Tabla 1.

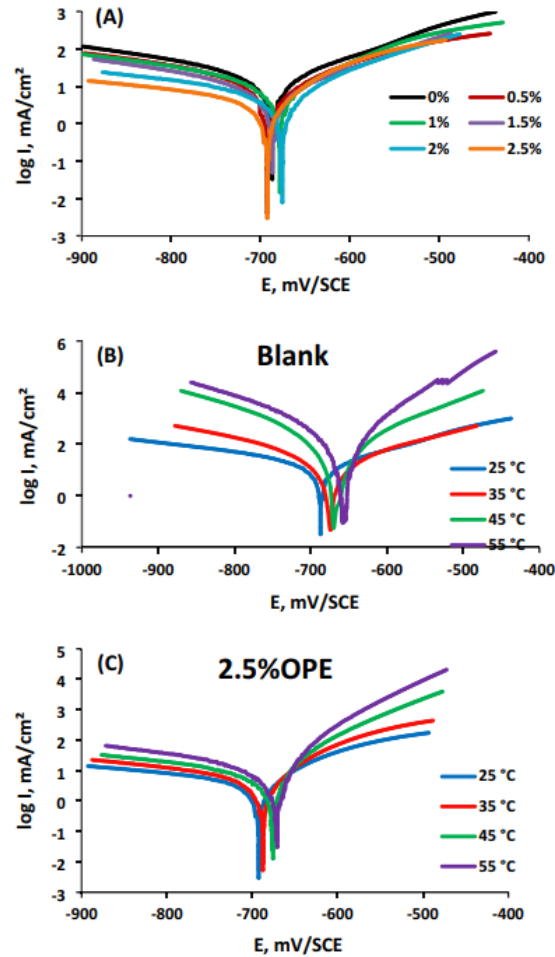
Parámetros potencio dinámicos para acero al carbono en agua de formación en concentración de 2,5% extracto de cascara en un rango de temperatura (25-55°C).

	Temperatura (°C)	E_{corr} (mV/SCE)	I_{corr} (mA/cm ²)	Ba (mV/dec)	$-\beta_c$ (mV/dec)	Velocidad de corrosión C_R (mpy)	θ	Eficiencia del inhibidor IE%
Sin inhibidor	25	-687	41.4	123	289	251	-	-
	35	-675	44.5	100	161	270	-	-
	45	-673	79.4	124	129	360	-	-
	55	-660	97.7	124	250	390	-	-
Extracto de cascara de naranja	25	-693	4.5	123	155	53	0.9013	90.13
	35	-695	5.6	144	86	64	0.8804	88.04
	45	-690	7.5	156	72	81	0.8799	87.99
	55	-682	12.6	195	42	140	0.8686	86.86

*Nota.** Parámetros potencio dinámicos para acero al carbono en agua de formación en concentración de 2,5% extracto de cascara en un rango de temperatura (25-55°C). Tomado de “Eco-friendly orange peel extract as corrosion resistant for carbon steel's deterioration in petroleum formation water. 2023”

Figura 8.

Curvas potencio-dinámicas de un acero al carbono en agua de formación (a) varias concentraciones de extracto de cascara de naranja a 25°C. (b) Sin inhibidor en un rango de 25-55°C. (c) Inhibidor al 2.5% en un rango de 25-55°C.



*Nota.** Curvas potencio-dinámicas de un acero al carbono en agua de formación (a) varias concentraciones de extracto de cascara de naranja a 25°C. (b) Sin inhibidor en un rango de 25-

55°C. (c) Inhibidor al 2.5% en un rango de 25-55°C. Tomado de “Eco-friendly orange peel extract as corrosion resistant for carbon steel’s deterioration in petroleum formation wáter. 2023”

La temperatura desempeña un papel determinante en el rendimiento de los inhibidores de corrosión, ya que un incremento en este parámetro puede modificar la estabilidad y la adhesión de la película protectora sobre la superficie metálica. En el caso del inhibidor 1-hexadecyl-2,3-dimethyl imidazolium bromide (C16DMIMBr), a medida que la temperatura aumenta, el compuesto alcanza un punto crítico de disolución que favorece su difusión hacia la solución, lo que reduce su capacidad de adsorción sobre el acero N80 (Yan et al. 2023).

Tabla 2.

Velocidad de corrosión y eficiencia del inhibidor medida por el método de pérdida de masa a diferentes temperaturas.

Temperatura (°C)	$v_0/g*m^{-2}*h^{-1}$	$v/g*m^{-2}*h^{-1}$	Porcentaje de eficiencia $\eta\%$
60	338.7868	71.04779	79.03
80	675.1471	66.25	90.19
100	1666.93	143.9808	91.36
120	2669.485	480.6874	81.99
140	2944.485	2016.967	31.5

Nota. * Velocidad de corrosión y eficiencia del inhibidor medida por el método de pérdida de masa a diferentes temperaturas. Tomado de “Synergistic mechanism of ternary green corrosion inhibitors for N80 steel in 20 wt% HCl solution: Encapsulation and transportation of vanillin through micelles formed by ionic liquids. 2023”

En el caso del acero API N80, se observa que existe un rango de temperatura favorable para el desempeño del inhibidor; no obstante, al exceder dicho rango la protección se ve

comprometida por la eficiencia de inhibición ($\% \eta$), la cual aumenta de forma sostenida hasta los 100 °C. Sin embargo, al superar este valor, la efectividad disminuye entre un 10 % y un 33 % a 120 °C y 140 °C.

Sostenibilidad

La economía circular desempeña un papel fundamental en la gestión de los residuos generados por la industria de jugos, la cual produce millones de toneladas de subproductos cada año. En el caso de los cítricos pertenecientes a la familia Rutaceae (lima, limón, mandarina y naranja), la producción mundial alcanzó aproximadamente 82 millones de toneladas en 2009–2010. De esta producción, alrededor del 34 % se destinó a la elaboración de jugos, lo que generó un 44 % de cáscara como subproducto (Marzorati et al. 2018). Esta elevada proporción de residuos pone en evidencia el gran potencial de aprovechamiento de estos en aplicaciones sostenibles, entre ellas el desarrollo de inhibidores de corrosión verdes.

Los residuos cítricos constituyen una fuente valiosa de compuestos bioactivos y aceites esenciales. Cabe destacar que los subproductos de cítricos (cáscaras, bagazo y semillas) representan entre un 50 % y un 70 % del peso total del fruto procesado, lo que refuerza su potencial de aprovechamiento en aplicaciones industriales y ambientales (Medina-Herrera et al. 2024). Según Ramos and Kempka (2024) estimo que, a partir de un kilogramo de estos residuos, pueden recuperarse cantidades significativas de flavonoides como 8.11 g de hesperitina, 5.76 g de naringenina y 3.25 g de nobiletina, utilizando métodos relativamente simples como la homogenización hidroalcohólica o la extracción verde.

La extracción y aprovechamiento de estos compuestos en biorrefinerías permite obtener aceites esenciales limoneno, pectina, etanol y metano, contribuyendo a la reducción de costos de

producción y a los principios de la economía circular. En este contexto Ramos and Kempka (2024) afirmaron que compuestos como los inhibidores presentan un alto potencial farmacéutico y comercial (US\$ 11.5 mil millones en 2022), posicionando a los residuos cítricos como una materia prima estratégica para la sostenibilidad y la innovación industrial.

El D-limoneno constituye uno de los compuestos más relevantes en los aceites esenciales extraídos de las pieles y hojas de diversas plantas. Su concentración depende tanto de la especie vegetal como de las condiciones de cultivo y del método de extracción empleado. Entre los procesos más utilizados se incluyen el uso de disolventes orgánicos, disolventes de base biológica y solventes eutécticos profundos de origen natural. Sin embargo, la eficiencia de extracción puede verse condicionada por factores como la dosis de disolvente aplicada, las características fisicoquímicas de la materia prima y las variaciones estacionales, climáticas y geográficas que influyen en la composición del material vegetal (Lin et al., 2024).

Tabla 3.*Composición y fuente de D-limonene.*

Planta (Aceite esencial)	Partes	Composición (%)
Citrus × sinensis	Cascara de fruta	98.54
Citrus × aurantium	Cascara de fruta	93.7
Citrus reticulata	Cascara de fruta	91.65
Citrus deliciosa	Cascara de fruta	91.27
Tetradium daniellii	Hojas, Frutas	72.71
Hyptis Jacq	Hojas, Tallos finos	72.6
Cymbopogon citratus	-	71
Citrus unshiu	Cascara de frutas	70.22
Citrus maxima	Cascara de frutas	67.58
Citrus × limon	Hojas secas, Cascara de frutas	62.97
Citrus × latifolia	Cascara de frutas	54.71
Bursera graveolens	Frutas	43.6
Citrus medica	Hojas, Frutas	39.77
Psidium guajava	Hojas	38.01
Citrus bergamia	-	21.47
Zanthoxylum schinifolium	-	21.24
Litsea cubeba	Frutas	14.3
Zanthoxylum armatum	Hojas, Frutas	10.7

*Nota.** Composición y fuente de D-limonene. Tomado de “D-Limonene: Promising and Sustainable Natural Bioactive Compound. 2024”

Entre los componentes no polares, Medina-Herrera et al. 2024 destaca el limoneno como el más abundante en los aceites esenciales, alcanzando proporciones de hasta el 96 %. Para su obtención, se emplean técnicas convencionales como la destilación, la hidrodestilación y el prensado en frío, siendo esta última reconocida por su menor impacto ambiental en comparación con procesos basados en solventes tóxicos. De manera reciente, se han desarrollado alternativas más sostenibles mediante el uso de solventes eutécticos naturales profundos, que permiten obtener limoneno con mayor pureza y reducen los efectos ambientales asociados a los solventes tradicionales como el hexano.

La producción de limoneno puede realizarse tanto a partir de algas como de residuos cítricos. Sin embargo, los análisis de ciclo de vida han mostrado que la ruta algal presenta un mayor impacto ambiental, especialmente en indicadores como el agotamiento de la capa de ozono y de recursos naturales. Esto se debe principalmente al alto factor de asignación atribuido a la producción de limoneno mediante algas (66%) en comparación con la ruta basada en residuos cítricos (1%). No obstante, la producción algal de limoneno también ofrece ventajas relevantes, como el aprovechamiento de la biomasa residual para procesos de gasificación y generación de electricidad, lo que abre oportunidades adicionales en términos de sostenibilidad energética (Zhang et al., 2018).

Tabla 4.

Resultados del análisis económico del proceso de producción de carbonato de poli-limoneno

Precio (USD/kg)	
Limonene (citrus)	1.35
Limonene (algae)	1.57
Tert-butyl alcohol	1.48
Hydrogen peroxide	0.4
Methanol	0.3
CO ₂	0

Nota. * Resultados del análisis económico del proceso de producción de carbonato de poli-limoneno. Tomado de “Life cycle assessments of bio-based sustainable polylimonene carbonate production processes. 2018”

El costo de extracción del limoneno a partir de residuos cítricos se ha estimado en aproximadamente 76 USD por tonelada, considerando los costos variables asociados al proceso de extracción. Según Durkin et al. (2019), este procedimiento involucra la extracción por arrastre de vapor del aceite presente en las cáscaras, seguida de una etapa de purificación mediante destilación

al vacío. Asimismo, la recuperación del limoneno contribuye a mejorar la economía global del proceso, ya que genera un crédito como subproducto al 97% de 0,22 USD/L, tomando como referencia un precio de venta de 1,1 USD/L. Esto evidencia que, en el contexto de una biorrefinería integral de residuos cítricos, donde también se obtienen coproductos como etanol y metano, el costo de producción del limoneno es rentable (Lohrasbi et al. 2010).

Según (China THPs, THPs Wholesale, Manufacturers, Price Made-in-China.com), el costo aproximado de THPS (Tetrakis(hydroxymethyl)phosphonium sulfate) que es uno de los inhibidores y biocidas comerciales más utilizados en la industria petrolera, particularmente en la protección de tuberías de acero API. De acuerdo con catálogos industriales, el THPS en concentraciones del 75 % se comercializa aproximadamente en 1,35–2,50 USD por kilogramo.

Para establecer la comparación económica entre D-limoneno y THPS como inhibidores de corrosión teniendo en cuenta el análisis realizado por Unsal et al. (2022), considerando un precio de 1,1 USD/L para el D-limoneno, y asumiendo una densidad de 0,841 kg/L, el costo estimado por kilogramo es de aproximadamente 1,31 USD. A una concentración de 100 ppm equivalente a 0,1 kg de inhibidor por m³ de solución, el gasto calculado sería de 0,131 USD/m³.

Por otro lado, el inhibidor comercial THPS, con un precio de 1,5 USD/kg al 75 % de pureza, presenta un costo ajustado de 2,0 USD/kg. En la misma concentración de 100 ppm, el costo por m³ de solución alcanza los 0,20 USD/m³. De esta manera, aunque la diferencia entre ambos compuestos es menor en comparación con escenarios de menor costo para el D-limoneno, este compuesto natural continúa siendo aproximadamente 1,5 veces más económico que el THPS, lo que refuerza su competitividad como inhibidor verde en aplicaciones industriales.

7. Conclusiones

La biomasa residual de limón constituye una alternativa sostenible y efectiva para el desarrollo de inhibidores de corrosión en aceros utilizados en la industria petrolera, como el API N80. Sus componentes principales, entre ellos D-limoneno, terpenos, pectina y flavonoides, han demostrado una elevada capacidad de adsorción en la superficie metálica, favoreciendo la formación de películas protectoras con eficiencias de inhibición superiores al 80 % en medios ácidos, tal como se observó en estudios con *Citrus limetta*, *Citrus reticulata* y *Citrus sinensis*. Además, la presencia de pectina refuerza esta acción, confirmando la versatilidad de los residuos cítricos como fuente de inhibidores naturales.

A partir de la revisión de literatura realizada, se observa que los inhibidores naturales presentan un desempeño notable en la reducción de la corrosión bajo distintas condiciones experimentales. En particular, la pectina proveniente de la cáscara de sandía alcanzó eficiencias de hasta 95,4% en HCl a 200 ppm en acero dulce, mientras que sus derivados amínicos lograron un 93,91% en H₂SO₄ a 400 ppm en acero API N80. Asimismo, estudios con flavonoides de *Gleditsia* reportaron una capacidad inhibidora del 92% en acero API N80 tras 144 horas en HCl, y del 94,9% en acero dulce en el mismo medio, destacando la estabilidad de los compuestos fenólicos frente a condiciones prolongadas. En relación con la temperatura, el inhibidor C16DMIMBr mostró eficiencias de 90,19% a 80 °C y 91,36% a 100 °C en acero API N80, confirmando su resistencia en condiciones severas, mientras que un extracto de naranja al 2,5% alcanzó 90,13% de eficiencia en agua de formación a 25 °C en aceros al carbono.

A nivel económico, el aceite esencial de D-limoneno muestra ser una opción altamente competitiva, resultando aproximadamente 1,5 veces más económico que inhibidores sintéticos

como el THPS, un biocida de uso extendido en tuberías petroleras. De esta manera, se confirma que los inhibidores verdes a base de D-limoneno no solo son técnicamente eficaces para la protección del acero API N80, sino que también representan una opción más accesible y alineada con los principios de sostenibilidad y economía circular.

Referencias Bibliográficas

- Durkin, A., Tapygin, I., Kong, Q., Resul, M. F. M. G., Rehman, A., Fernández, A. M. L., Harvey, A. P., Shah, N., & Guo, M. (2019). Scale-up and Sustainability Evaluation of Biopolymer Production from Citrus Waste Offering Carbon Capture and Utilisation Pathway. *ChemistryOpen*, 8(6), 668–688. <https://doi.org/10.1002/open.201900015>
- Eddy, N. O., Odiongenyi, A. O., Ebenso, E. E., Garg, R., & Garg, R. (2023). Plant wastes as alternative sources of sustainable and green corrosion inhibitors in different environments. *Corrosion Engineering Science and Technology the International Journal of Corrosion Processes and Corrosion Control*, 58(5), 521–533. <https://doi.org/10.1080/1478422x.2023.2204260>
- 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>
- Elizondo-Villarreal, N., Verástegui-Domínguez, L., Rodríguez-Batista, R., Gándara-Martínez, E., Alcorta-García, A., Martínez-Delgado, D., Rodríguez-Castellanos, E. A., Vázquez-Rodríguez, F., & Gómez-Rodríguez, C. (2022). Green synthesis of magnetic nanoparticles of iron oxide using aqueous extracts of lemon peel waste and its application in Anti-Corrosive coatings. *Materials*, 15(23), 8328. <https://doi.org/10.3390/ma15238328>
- Fawzi, M., Laamari, Y., Koumya, Y., Oubella, A., Auhmani, A., Itto, M. Y. A., Abouelfida, A., Riahi, A., & Auhmani, A. (2021). Electrochemical and theoretical studies on the corrosion inhibition performance of some synthesized d-Limonene based heterocyclic

compounds. *Journal of Molecular Structure*, 1244, 130957.

<https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2021.130957>

Geethamani, P., Narmatha, M., Dhanalakshmi, R., Aejitha, S., & Kasthuri, P. K. (2018).

Corrosion inhibition and adsorption properties of mild steel in 1 M hydrochloric acid medium by expired ambroxol drug. *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*, 5(1).

<https://doi.org/10.1007/s40735-018-0205-5>

Gopiraman, M., Sathya, C., Vivekananthan, S., Kesavan, D., & Sulochana, N. (2011). Influence

of 2,3-Dihydroxyflavanone on corrosion inhibition of mild steel in acidic medium.

Journal of Materials Engineering and Performance, 21(2), 240–246.

<https://doi.org/10.1007/s11665-011-9925-0>

Haque, J., Ansari, K., Srivastava, V., Quraishi, M., & Obot, I. (2017). Pyrimidine derivatives as

novel acidizing corrosion inhibitors for N80 steel useful for petroleum industry: A

combined experimental and theoretical approach. *Journal of Industrial and Engineering*

Chemistry, 49, 176–188. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2017.01.025>

Klimek-Szczykutowicz, M., Szopa, A., & Ekiert, H. (2020). Citrus limon (Lemon)

Phenomenon—A Review of the Chemistry, Pharmacological Properties, Applications in the Modern Pharmaceutical, Food, and Cosmetics Industries, and Biotechnological

Studies. *Plants*, 9(1), 119. <https://doi.org/10.3390/plants9010119>

Kokalj, A. (2021). Corrosion inhibitors: physisorbed or chemisorbed? *Corrosion Science*, 196,

109939. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109939>

Lin, H., Li, Z., Sun, Y., Zhang, Y., Wang, S., Zhang, Q., Cai, T., Xiang, W., Zeng, C., & Tang, J.

(2024). D-Limonene: promising and sustainable natural bioactive compound. *Applied*

Sciences, 14(11), 4605. <https://doi.org/10.3390/app14114605>

- Lohrasbi, M., Pourbafrani, M., Niklasson, C., & Taherzadeh, M. J. (2010). Process design and economic analysis of a citrus waste biorefinery with biofuels and limonene as products. *Bioresource Technology*, 101(19), 7382–7388.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.04.078>
- Loukili E. H., Azzaoui K., Author J. O., Author V., Hammouti B. (2022) Corrosion Inhibition using Green Inhibitors: An Overview, *Maghr. J. Pure & Appl. Sci.*, 8(2), 82-93. DOI: <https://doi.org/10.48383/IMIST.PRSM/mjpas-v8i1.29392>
- Madrid, F. M. G., Soliz, A., Cáceres, L., Bergendahl, M., Leiva-Guajardo, S., Portillo, C., Olivares, D., Toro, N., Jimenez-Arevalo, V., & Páez, M. (2024). Green Corrosion Inhibitors for Metal and Alloys Protection in Contact with Aqueous Saline. *Materials*, 17(16), 3996. <https://doi.org/10.3390/ma17163996>
- Marzorati, S., Verotta, L., & Trasatti, S. P. (2018). Green Corrosion Inhibitors from Natural Sources and Biomass Wastes. *Molecules*, 24(1), 48.
<https://doi.org/10.3390/molecules24010048>
- Medina-Herrera, N., Martínez-Ávila, G. C. G., Robledo-Jiménez, C. L., Rojas, R., & Orozco-Zamora, B. S. (2024). From citrus Waste to Valuable Resources: A biorefinery approach. *Biomass*, 4(3), 784–808. <https://doi.org/10.3390/biomass4030044>
- Najem, A., Boudalia, M., Sabiha, M., Laqhaili, A., Chibani, A., Chahboun, N., Bellaouchou, A., & Zarrouk, A. (2024). Exploring citrus waste’s potential as an antioxidant, antibacterial, and anti-corrosion agent. *Chemical Data Collections*, 50, 101114.
<https://doi.org/10.1016/j.cdc.2024.101114>
- Ouadi, Y. E., Fal, M. E., Hafez, B., Manssouri, M., Ansari, A., Elmsellem, H., Ramli, Y., & Bendaif, H. (2020). Physisorption and corrosion inhibition of mild steel in 1 M HCl using

a new pyrazolic compound: Experimental data & quantum chemical calculations.

Materials Today Proceedings, 27, 3010–3016.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.340>

Parangusan, H., Sliem, M. H., Abdullah, A. M., Elhaddad, M., Al-Thani, N., & Bhadra, J.

(2024). Plant Extract as Green Corrosion inhibitors for Carbon steel substrate in different environments: A systematic review. International Journal of Electrochemical Science,

100919. <https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2024.100919>

Rafiq, S., Kaul, R., Sofi, S., Bashir, N., Nazir, F., & Nayik, G. A. (2016). Citrus peel as a source of functional ingredient: A review. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences,

17(4), 351–358. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2016.07.006>

Ramos, A. F., & Kempka, A. P. (2024). Bioinformatics for circular economy research decision-making: A case study in obtaining bioactive peptides from Citrus sinensis peels via

limonene synthase analysis. Sustainable Chemistry for the Environment, 6, 100101.

<https://doi.org/10.1016/j.scenv.2024.100101>

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

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

Sowmyashree, A., Somya, A., Rao, S., Kumar, C. P., Al-Romaizan, A. N., Hussein, M. A.,

Khan, A., Marwani, H. M., & Asiri, A. M. (2023). Potential sustainable electrochemical corrosion inhibition study of Citrus limetta on mild steel surface in aggressive acidic media. Journal of Materials Research and Technology, 24, 984–994.

<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.02.039>

- Sun, C., Theodoropoulos, C., & Scrutton, N. S. (2019). Techno-economic assessment of microbial limonene production. *Bioresource Technology*, 300, 122666. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122666>
- Tu, S., Jiang, J., Li, P., Li, R., & Tang, Q. (2024). Gleditsia sinensis extract as green corrosion inhibitor for N80 steel in 1 M HCl. *Journal of Molecular Structure*, 1321, 139890. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2024.139890>
- Unsal, T., Wang, D., Kijlka, P., Kumseranee, S., Punpruk, S., Mohamed, M. E., Saleh, M. A., & Gu, T. (2022). Food-grade D-limonene enhanced a green biocide in the mitigation of carbon steel biocorrosion by a mixed-culture biofilm consortium. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 45(4), 669–678. <https://doi.org/10.1007/s00449-021-02685-6>
- Wang, Q., Wang, R., Zhang, Q., Zhao, C., Zhou, X., Zheng, H., Zhang, R., Sun, Y., & Yan, Z. (2023). Application of biomass corrosion inhibitors in metal corrosion control: a review. *Molecules*, 28(6), 2832. <https://doi.org/10.3390/molecules28062832>
- Wong-Paz, J. E., Aguilar-Zárate, P., Veana, F., & Muñoz-Márquez, D. B. (2020). Impacto de las tecnologías de extracción verdes para la obtención de compuestos bioactivos de los residuos de frutos cítricos. *Deleted Journal*, 23. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2020.0.255>
- Wu, Y., Zeng, L., Zheng, Y., You, F., & Liu, X. (2024). Pectin-derived nitrogen-doped carbon dots as green corrosion inhibitors for N80 steel in 1 M sulfuric acid solution. *Applied Surface Science*, 162245. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.162245>
- Yan, H., Dai, S., Liu, P., & Zhu, Y. (2023). Synergistic mechanism of ternary green corrosion inhibitors for N80 steel in 20 wt% HCl solution: Encapsulation and transportation of

vanillin through micelles formed by ionic liquids. *Corrosion Science*, 227, 111750.

<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2023.111750>

Zhang, D., Del Rio-Chanona, E. A., Wagner, J. L., & Shah, N. (2018). Life cycle assessments of bio-based sustainable polylimonene carbonate production processes. *Sustainable Production and Consumption*, 14, 152–160. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2018.03.001>