

ARTÍCULOS

Plantas que protegen: explorando alternativas ecológicas para la prevención de la corrosión

Plants that protect: exploring ecological alternatives for corrosion prevention

Irma Alondra Hermoso Díaz

ORCID: 0009-0007-6103-5230, irma.hermoso@uaem.mx

Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAP),
Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM)

José Gonzalo González Rodríguez

ORCID: 0000-0002-5934-3126, ggonzalez@uaem.mx

Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAP),
Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM)

Recepción: 16/11/23. Aceptación: 01/03/24. Publicación: 09/09/24

RESUMEN

La *química verde*, conocida también como química sostenible, ha encontrado un aliado en la contienda contra la degradación de metales y aleaciones, a través del uso de extractos de plantas como inhibidores de corrosión. Este artículo tiene el objetivo de difundir hallazgos clave en la investigación de los inhibidores de corrosión a base de extractos de plantas, su origen, su mecanismo de funcionamiento, las ventajas y desafíos de su uso y algunas técnicas experimentales para evaluar su eficiencia. Se ilustra cómo la ciencia y la ingeniería pueden converger en soluciones respetuosas con el medio ambiente a un problema global, como lo es la degradación de los metales.

PALABRAS CLAVE

corrosión, compuestos naturales, inhibidores de corrosión, química verde

ABSTRACT

Green chemistry, also known as sustainable chemistry, has found an ally in the fight against metal and alloy degradation through the use of plant extracts as corrosion inhibitors. This article aims to disseminate key findings in the research on corrosion inhibitors based on plant extracts, their origin, mechanism of action, the advantages and challenges of their use and experimental techniques to evaluate inhibitor efficiency. It illustrates how science and engineering can converge on environmentally friendly solutions to a global issue such as metal degradation.

KEYWORDS

corrosion, corrosion inhibitors, green chemistry, natural compounds

Un mundo con posibilidades ecológicas

En el ámbito de la ingeniería y la construcción, los materiales metálicos, especialmente las aleaciones, desempeñan un papel importante debido a sus ventajas mecánicas y económicas, por ejemplo, por su alta resistencia mecánica y su costo económico (Lavanya et al., 2023; Zhang et al., 2023). Sin embargo, la mayoría de los metales y sus aleaciones en su forma pura son altamente reactivos y propensos a la corrosión debido a su interacción con los componentes del entorno. La corrosión es un proceso en el que los materiales metálicos experimentan degradación debido a reacciones químicas o electroquímicas al entrar en contacto con el entorno. En este proceso, el metal pierde electrones, es decir, se oxida, y la ausencia de estos electrones crea vacíos en el metal, lo que contribuye a su deterioro. Este fenómeno no sólo implica pérdidas económicas significativas, sino que también representa riesgos para la seguridad a nivel global. De hecho, la corrosión se traduce en pérdidas que equivalen al 3.5% del producto interno bruto mundial (Koch, 2017; Umoren et al., 2020; Verma, Lgaz et al., 2018).

El desafío de la corrosión se agrava en particular en los procesos de obtención de metales puros a partir de minerales metálicos. Durante estas operaciones se utilizan soluciones de ácidos muy concentradas, lo que conduce a la disolución de componentes metálicos, así como de impurezas en forma de óxido (Al-Amiery y Al-Azzawi, 2023; Dehghani y Ramezanzadeh, 2023; Nazari et al., 2023). Dada la gravedad de los riesgos vinculados a este fenómeno, a lo largo de la historia de la humanidad ha habido un esfuerzo continuo para desarrollar, mejorar y adaptar medidas efectivas que prevengan el deterioro de los materiales metálicos.

Entre las estrategias más prácticas y económicamente viables para prevenir y mitigar la degradación destaca el uso de inhibidores. Éstos son compuestos químicos que, al ser añadidos en pequeñas cantidades en un entorno corrosivo, desaceleran el proceso de degradación u oxidación. La acción de inhibición implica la interrupción o prevención de las reacciones químicas entre la superficie metálica y el oxígeno circundante o especies erosivas existentes en el medio. Los compuestos activos en el inhibidor se adhieren a la superficie y forman una película protectora que aísla los metales de su entorno agresivo.

El uso de inhibidores constituye uno de los métodos más antiguos empleados para la protección contra la degradación de los metales (Sastri, 2012). En la antigüedad, los romanos emplearon diversos compuestos, como el betún, extractos de alquitrán, salvado, gelatina y pegamento para contrarrestar la corrosión ácida del acero (Dillmann et al., 2013; Putilova, 1960). En una etapa posterior, durante los procesos de decapado del acero, se empezaron a incorporar aceites y melaza como forma de prevenir la degradación del metal (Dillmann et al., 2013). Posteriormente, en 1900, Robinson y Sutherland publicaron una patente sobre la inhibición del decapado de acero mediante el uso de almidón (Verma, Aslam et al., 2021). En 1907, Laverti patentó la aplicación de aceites para el proceso de limpieza química de metales con ácido sulfúrico (Verma, Aslam et al., 2021).

Entre 1960 y 1980, a pesar de su toxicidad, se emplearon sales inorgánicas, como cromatos, fosfatos, nitratos, silicatos, boratos y sales a base de zinc, debido a su buen funcionamiento como inhibidores (Alhaffar et al., 2018; De Damborenea et al., 2014; Verma, Obot et al., 2018). Después de 1980 comenzaron a tenerse en cuenta los efectos ecológicos de los procesos y productos químicos en los ecosistemas. Este cambio fue impulsado debido a décadas de explotación desmedida de los recursos naturales y por la generación de contaminantes a una escala sin precedentes, principalmente, además de algunos desastres ambientales, como derrames de petróleo y contaminación del agua, que capturaron la atención pública y resaltaron la necesidad de proteger el medio ambiente.

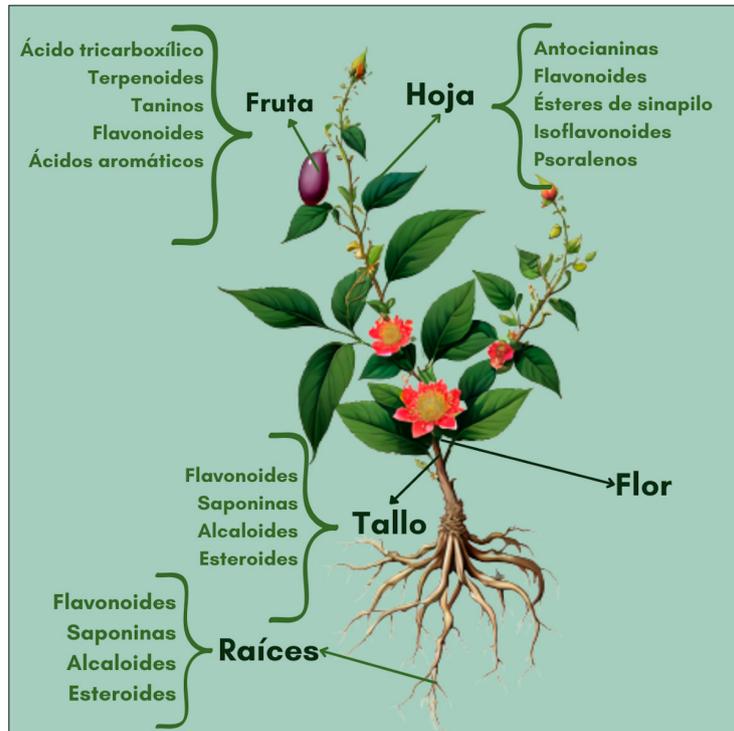
En tiempos recientes, con el crecimiento de la conciencia ecológica, se ha impuesto una restricción total al uso de inhibidores tradicionales debido a su alta toxicidad. Desde 1995, los científicos e ingenieros especializados en degradación de metales han dirigido sus esfuerzos hacia el diseño y la síntesis de alternativas respetuosas con el medio ambiente (Verma, Obot et al., 2018). En respuesta a los desafíos actuales han surgido sistemas modernos de protección contra el desgaste de estos materiales que buscan opciones más amigables con el entorno. Estos sistemas ofrecen un alto nivel de eficiencia protectora en concentraciones bajas y presentan riesgos mínimos para la salud, el medio ambiente y la seguridad (Alhaffar et al., 2018; Kaczerewska et al., 2018; Verma, Quraishi et al., 2018).

Un enfoque especialmente prometedor en esta búsqueda de alternativas ecológicas son los compuestos encontrados en extractos de plantas. Investigaciones previas han revelado que diversos extractos de partes vegetales, como hojas, frutos, semillas y raíces, pueden desempeñar un papel eficaz como inhibidores de corrosión (Chowdhury et al., 2023; Eid et al., 2023; Liao et al., 2023; Miralrio y Espinoza Vázquez, 2020; Ribeiro Maestro et al., 2023; Méndez et al., 2023; Shanmugapriya et al., 2023; Wang, Deng et al., 2023; Wang, Wu et al., 2023; Zlatić et al., 2023). En la figura 1 (p. 4) se ilustran las partes de la planta que pueden emplearse para la elaboración de inhibidores a base de extractos naturales, gracias a la presencia de compuestos químicos con propiedades antioxidantes.

Las plantas han demostrado ser una fuente rica en antioxidantes, y estas propiedades se utilizan para desacelerar el proceso de degradación en los metales. Los extractos naturales han sido aplicados con éxito bajo diversas condiciones como inhibidores. Entre ellos se encuentran los aceites obtenidos de desechos agroindustriales, aguacate, mango, mamey, durazno, arroz, café, entre otros (Da Costa et al., 2020; Pal y Das, 2022; Rahmani et al., 2023; Sotelo et al., 2023; Vorobyova y Skiba, 2021). Esto ha generado un creciente interés en la investigación y aplicación de estos *extractos de plantas como inhibidores de corrosión* (EPIC).

En la tabla 1 (p. 5) se presentan algunos estudios que informan sobre el uso de extractos de plantas como inhibidores. Estas investigaciones abordan diversas plantas, solventes, metales y entornos corrosivos. Por ejemplo, el extracto de piña como inhibidor de corrosión

Figura 1
Partes básicas de una planta y sus compuestos activos comunes



Fuente: elaboración propia.

aplicado en ácido clorhídrico para proteger el acero al carbono logró una eficiencia del 98% (Mirallio y Espinosa Vázquez, 2020).

La magia de las plantas en la prevención de la corrosión

A lo largo de millones de años de evolución, las plantas han desarrollado antioxidantes, moléculas capaces de donar electrones adicionales o de recibir electrones sin volverse inestables. En el mundo vegetal, los antioxidantes desempeñan un papel importante, ya que actúan como protectores contra los efectos perjudiciales de los radicales libres. Éstos son generados como subproductos naturales del metabolismo y de la exposición a factores estresantes ambientales, y tienen el potencial de dañar las estructuras celulares al provocar la oxidación de los compuestos químicos en las plantas (Clark, 2023; Kliebenstein y Kvitko, 2023; Xiao et al., 2022). Para contrarrestar este daño, las plantas han desarrollado antioxidantes, como los polifenoles, flavonoides, carotenoides, entre otros. Estos compuestos contienen en su estructura química carbono, hidrógeno, oxígeno u otros átomos que ayudan a neutralizar los radicales libres y proteger las células vegetales (Saleem et al., 2022).

Tabla 1
Parámetros obtenidos con extractos de plantas evaluadas
como inhibidores de corrosión en acero

Planta (<i>nombre científico</i>)	Solvente utilizado como medio de extracción	Metal	Medio corrosivo	Eficiencia (%)
Piña (<i>ananas comosus</i>)	Agua	Acero al carbono	Ácido clorhídrico	98
Incienso de Canarias (<i>artemisia herba-alba</i>)	Agua	Acero inoxidable	Ácido fosfórico	88
Hierba té (<i>bacopa monnieri/lawsonia inermis</i>)	Agua	Acero bajo en carbono	Hidróxido de sodio	80
Té verde (<i>camellia sinensis</i>)	Agua	Acero al carbono	Cloruro de sodio	80
Peumo (<i>cryptocarya nigra</i>)	Hexano, metanol	Acero dulce	Ácido clorhídrico	91
Eucalipto blanco (<i>eucalyptus globulus</i>)	Agua	Acero bajo en carbono	Ácido sulfúrico	88
Golondrina (<i>euphorbia heterophylla linneo</i>)	Agua	Acero dulce	Ácido clorhídrico	93
Tabaco (<i>nicotiana tabacum</i>)	Agua	Acero Q235	Hidróxido de sodio	88
Rosal silvestre (<i>rosa canina</i>)	Agua	Acero dulce	Ácido clorhídrico	90
Árbol de Buda (<i>saraca ashoka</i>)	Agua	Acero dulce	Ácido sulfúrico	93
Tamarindo (<i>tamarindus indica</i>)	Agua	Acero dulce	Cloruro de sodio	96

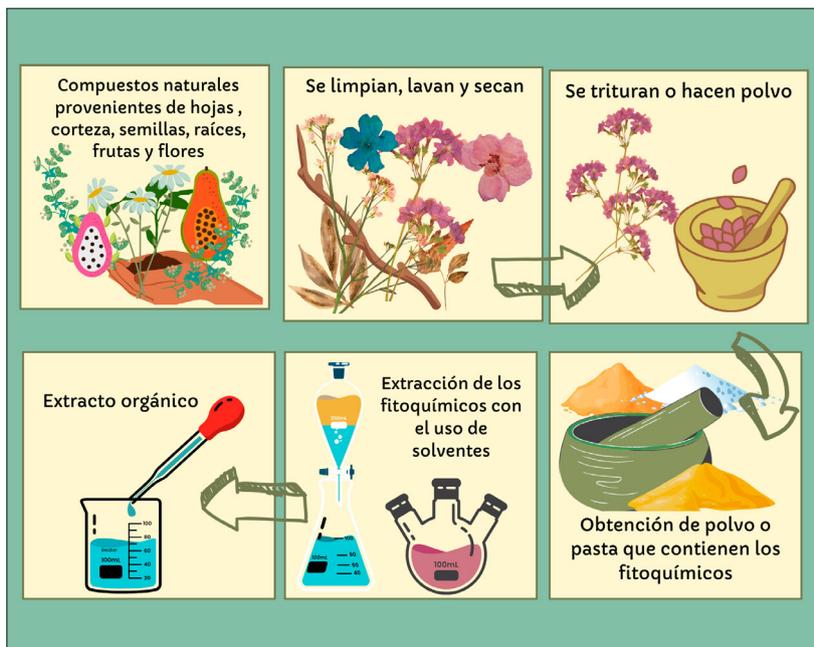
Fuente: Miralrío y Espinosa Vázquez (2020).

Los antioxidantes derivados de las plantas son valiosos para prevenir la corrosión en metales. En el ámbito de la protección contra la corrosión, donde la formación de radicales libres puede acelerar este proceso, cumplen un papel crucial. Cuando los metales interactúan con entornos corrosivos, la pérdida de electrones en su superficie conduce a la degradación y pérdida de material. Los antioxidantes vegetales, con electrones adicionales, al entrar en contacto con la superficie metálica forman una capa protectora al llenar los huecos en el metal. Esta capa funciona como defensa frente al entorno corrosivo, pues crea una barrera que evita la reacción con sustancias degradantes. Como resultado, la velocidad de corrosión disminuye notablemente, lo que contribuye a extender la vida útil del metal.

La exploración del uso de los EPIC no sólo posee relevancia desde una perspectiva ecológica, sino que también destaca la importancia y viabilidad de crear productos y procesos sostenibles en la ingeniería y la ciencia moderna. El proceso de obtención de estos extractos es diverso y abarca distintas etapas, como la recolección, limpieza, secado, trituración, disolución y extracción en solventes específicos (figura 2, p. 6). En una primera fase se selecciona la parte de la planta con la mayor concentración de compuestos de interés. Todas las partes se emplean para obtener los extractos, ya sean hojas, flores, semillas, raíces o tallos (figura 1, p. 4). Posteriormente, estas partes se trituran, aplastan o cortan y a veces se someten a un proceso

Figura 2

Ilustración de la preparación del extracto vegetal como inhibidor de corrosión



Fuente: elaboración propia.

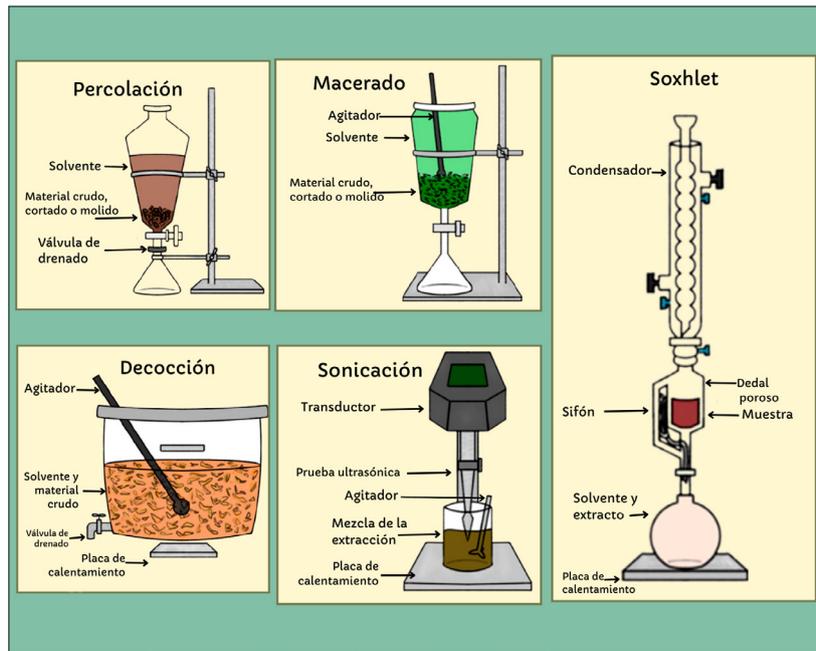
de secado previo. A continuación, se sumergen en el solvente de extracción seleccionado y según el método utilizado. Los sólidos suspendidos en la mezcla resultante se pueden separar mediante filtración. La figura 2 ilustra estos pasos en la elaboración de un EPIC.

Por otro lado, los procedimientos de extracción se basan en la aplicación de calor, enfriamiento y en la separación de los compuestos activos en presencia del solvente. Los métodos tradicionales incluyen maceración, infusión, decocción y percolación. Los procesos más avanzados comprenden la extracción continua en caliente y la extracción con ultrasonido o sonicación. La figura 3 (p. 7) presenta ejemplos de los métodos utilizados para obtener extractos de plantas. Es importante señalar que, debido a la diversidad de fuentes vegetales, solventes, metales y condiciones ambientales, las pruebas experimentales presentan desafíos en términos de estandarización y optimización de procesos. La variabilidad inherente a estas etapas requiere un enfoque cuidadoso para lograr resultados confiables y efectivos en la aplicación práctica de los EPIC.

Interacción de los fitoquímicos con las superficies metálicas

La naturaleza nos ofrece inspiración y soluciones abundantes, a menudo subestimadas. A lo largo del tiempo, las plantas han desarrollado compuestos químicos llamados fitoquímicos,

Figura 3
Métodos comunes para la elaboración de extractos naturales utilizados
como extractos de plantas inhibidores de corrosión (EPIC)

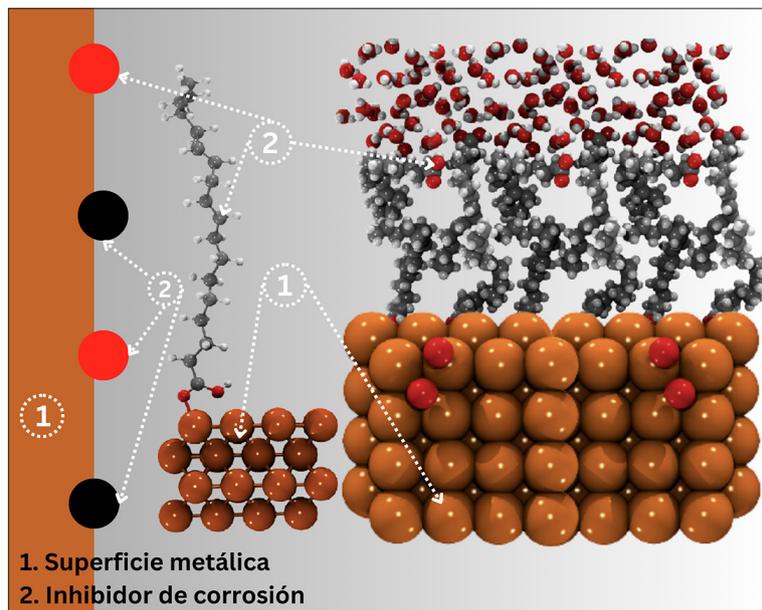


Fuente: Miralrío y Espinosa Vázquez (2020).

una adaptación biológica para sobrevivir frente a enfermedades, depredadores y condiciones adversas (Clark, 2023; Kliebenstein y Kvitko, 2023; Saleem et al., 2022). Es importante señalar que, aunque muchos fitoquímicos son antioxidantes, no todos los antioxidantes son fitoquímicos. Esta distinción se vuelve relevante en el ámbito científico y en la divulgación general sobre salud, donde a menudo se utilizan ambos términos de manera intercambiable. Así, mientras que los fitoquímicos representan una categoría específica de compuestos de origen vegetal, los antioxidantes abarcan un espectro más amplio de sustancias con la capacidad de contrarrestar el estrés oxidativo en diversas fuentes, incluyendo no sólo plantas, sino también alimentos y suplementos.

Es crucial resaltar que muchos fitoquímicos, gracias a sus propiedades antioxidantes, han demostrado ser eficaces en la protección de metales (Da Costa et al., 2020; Lavanya et al., 2023; Liao et al., 2023; Méndez et al., 2023; Pal y Das, 2022; Rahmani et al., 2023; Salleh et al., 2021; Sotelo et al., 2023; Vorobyova y Skiba, 2021). La eficacia de los extractos de plantas para prevenir la corrosión radica en su capacidad para interactuar con las superficies metálicas (Miralrío y Espinosa Vázquez, 2020; Salleh et al., 2021; Verma, Ebenso et al., 2018). Esta interacción se basa en la adsorción de los fitoquímicos a la superficie metálica, la cual es un proceso en el que los

Figura 4

Ilustración de la adsorción de la molécula ω_3 (omega 3) en una superficie de hierro

Fuente: Hermoso-Díaz et al. (2019).

compuestos se adhieren a la superficie del metal, formando una capa protectora que evita el contacto directo con agentes corrosivos. Esta capa funciona como un escudo que previene la corrosión y salvaguarda la integridad del metal. Un ejemplo de ello se encuentra en la figura 3 (p. 7), que ilustra la interacción del compuesto omega 3, presente en la *Salvia hispanica*, también conocida como chía, con la superficie metálica (Hermoso-Díaz et al., 2019; 2014).

Las propiedades químicas y la estructura molecular de los fitoquímicos son factores cruciales que rigen el mecanismo de adsorción en la superficie metálica. En términos simples, el modelo de adsorción generalmente sigue dos fenómenos: quimisorción o fisorción. La quimisorción implica enlaces más fuertes, mientras que la fisorción involucra fuerzas más débiles, como las fuerzas de Van der Waals, algo así como un simple apretón de manos, mientras que la primera sería algo similar a un abrazo fuerte.

Múltiples enlaces y grupos funcionales: clave de la efectividad (desafíos y beneficios)

Una de las características más notables de los fitoquímicos presentes en los extractos de plantas es su complejidad química. Estos compuestos contienen múltiples enlaces y grupos funcionales que les confieren propiedades especiales. Entre estos últimos se encuentran los hidroxilos (-OH), aminos (-NH₂), amidas (-CONH₂), cloruros de ácido (-COCL), ácidos carboxílicos (-COOH), ésteres (-COOC₂H₅), entre otros (Chauhan et al., 2021; Machado Fernandes

Figura 5
Ventajas y desafíos en el uso de los EPIC



Fuente: elaboración propia.

et al., 2020; Verma, Aslam et al., 2021; Verma, Lgaz et al., 2018; Verma et al., 2022; Verma y Quraishi, 2021). Estos grupos desempeñan un papel vital durante la adsorción de los fitoquímicos en las superficies metálicas. Sus enlaces y grupos polares les permiten interactuar de manera eficiente con la estructura metálica, con lo cual contribuyen a la formación de una capa protectora sólida.

En la figura 5 se resaltan las ventajas y desafíos asociados al uso de los EPIC, centrándose principalmente en su origen orgánico, lo que implica una reducción significativa de riesgos ambientales y de seguridad en comparación con inhibidores químicos convencionales. Además, la diversidad de extractos ofrece flexibilidad al elegir opciones para proteger metales bajo diversas condiciones.

No obstante, el uso de los EPIC presenta desafíos. Diferentes plantas y sus partes (hojas, ramas, frutos, semillas, entre otras) tienen composiciones químicas y eficiencias variables, lo que requiere investigaciones más extensas para evaluar su rendimiento. También es necesario evaluar su interacción con diferentes metales, aleaciones y condiciones ambientales. La durabilidad y la vida útil de los EPIC, en comparación con inhibidores químicos tradicionales, son áreas críticas de investigación que demandan mayor atención.

Tabla 2

Métodos de evaluación de inhibidores de corrosión en metales

Categoría	Método/Prueba	Descripción
Pruebas de inmersión	Pérdida de peso/gravimetría	Pruebas directas y confiables que sumergen las muestras metálicas en un entorno corrosivo, para evaluar la eficiencia del inhibidor a través del tiempo.
Evaluaciones electroquímicas	Análisis de impedancia, resistencia lineal a la polarización, voltametría cíclica, entre otros	Estas pruebas se realizan en las muestras metálicas, también llamadas electrodos de trabajo, en donde se varían las condiciones de temperatura y concentración del inhibidor.
Examen directo de superficies	Microscopía, espectroscopía, medición de mojabilidad, entre otros	Son técnicas que analizan directamente la superficie de las muestras después de la inmersión, lo que revela detalles sobre la composición, morfología y propiedades.

Fuente: elaboración propia.

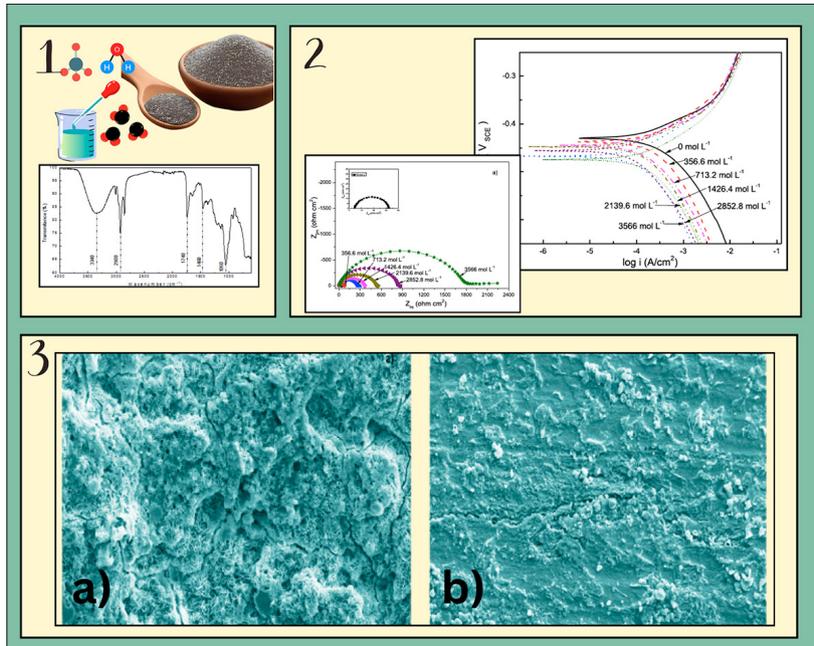
Técnicas experimentales para la evaluación de los inhibidores de corrosión

Los inhibidores de corrosión elaborados a partir de extractos naturales cumplen su función al adherirse a la superficie del metal, lo que proporciona protección contra la acción del entorno corrosivo. Para comprender el comportamiento de la adsorción se emplean diversas técnicas. Durante las pruebas experimentales se modifican las concentraciones de los EPIC, los tiempos de inmersión y la temperatura, siguiendo estándares internacionales establecidos por la ASTM, una organización que se ha dedicado al desarrollo y publicación de normas técnicas durante más de 120 años (ASTM International-Standards Worldwide, 2023).

La tabla 2 presenta de manera concisa información sobre distintas categorías de métodos y pruebas utilizados para evaluar la eficiencia de los inhibidores aplicados a muestras metálicas. Estas mediciones químicas y electroquímicas ofrecen evaluaciones cuantitativas que permiten calcular la adsorción del inhibidor y su desempeño protector, con lo que se obtienen parámetros como la velocidad de la corrosión, cobertura de la superficie y eficiencia del inhibidor, entre otros. En la figura 6 (p. 11) se presenta de manera general el proceso de caracterización y evaluación de un EPIC, donde se estudió el efecto de un inhibidor hecho de semillas de chía para proteger el acero al carbono en una solución de 0.5 M de ácido sulfúrico. En la misma figura también se incluyen algunas evaluaciones experimentales por medio de técnicas electroquímicas. Finalmente, utilizando un microscopio electrónico de barrido, se visualizan los productos de la corrosión formados en el acero al carbono debido a la interacción del metal con el medio corrosivo y a los fitoquímicos presentes en la chía (omega 3 y 6). Estas técnicas en su conjunto ofrecen una comprensión más clara de la interacción de un EPIC con la muestra metálica y su entorno.

Figura 6

Uso de evaluaciones experimentales para determinar la eficiencia de un EPIC



1) Caracterización del inhibidor; 2) Uso de técnicas electroquímicas; 3) Caracterización de productos de corrosión: a) Muestra metálica sin inhibidor, b) Mismo material con inhibidor.

Fuente: Hermoso-Díaz et al. (2014, 2019, 2021).

Alianza sostenible: plantas para la prevención de la corrosión

En este recorrido por las posibilidades ecológicas en la prevención de la corrosión se ha explorado el potencial prometedor de los extractos de plantas como inhibidores de corrosión. La *química verde*, representada por estos compuestos fitoquímicos, emerge como una aliada eficaz en la protección de metales, con lo cual se destaca la importancia de adoptar prácticas sostenibles en la ingeniería y la ciencia de materiales.

La historia evolutiva de los inhibidores, desde los métodos tradicionales hasta las alternativas ecológicas, refleja la continua adaptación de la comunidad científica a las demandas de un mundo que busca soluciones seguras y respetuosas con el medio ambiente. El uso de los EPIC no sólo se presenta como una respuesta a los desafíos actuales, sino también como una conexión invaluable entre la ciencia y la sabiduría acumulada por la naturaleza a lo largo de millones de años de evolución.

A pesar de los avances significativos persisten desafíos, como la variabilidad en la composición de los extractos y la necesidad de estudios más amplios para evaluar su eficiencia en diversas aplicaciones y medios. Sin embargo, la creciente conciencia de crear un mundo

sostenible impulsa la investigación hacia soluciones alineadas con los valores ecológicos. La alianza entre plantas y prevención de la corrosión representa un paso adelante hacia un mañana más sostenible, ya que los extractos vegetales se muestran como una opción prometedora en la protección contra la corrosión para este siglo. Desde la investigación de laboratorio hasta la aplicación industrial, la convergencia de la ciencia y la naturaleza abre nuevas vías para la protección de metales, al mismo tiempo que abraza la responsabilidad ambiental y la seguridad. Este viaje nos recuerda que, en la búsqueda de soluciones, la naturaleza sigue siendo nuestra maestra más sabia.

Referencias

- Al-Amiery, A. A. y Al-Azzawi, W. K. (2023). Organic synthesized inhibitors for corrosion protection of carbon steel: a comprehensive review. *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*, 9(4), 74. <https://doi.org/10.1007/s40735-023-00791-4>
- Alhaffar, M. T., Umoren, S. A., Obot, I. B. y Ali, S. A. (2018). Isoxazolidine derivatives as corrosion inhibitors for low carbon steel in HCL solution: Experimental, theoretical and effect of KI studies. *RSC Advances*, 8(4), 1764-1777. <https://doi.org/10.1039/C7RA11549K>
- ASTM International-Standards Worldwide (2023). 125 Years of ASTM. sp. <https://www.astm.org/about/125th-anniversary/astm-timeline.html>
- Chauhan, D. S., Verma, C. y Quraishi, M. A. (2021). Molecular structural aspects of organic corrosion inhibitors: experimental and computational insights. *Journal of Molecular Structure*, 1227, 129374. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2020.129374>
- Chowdhury, M. A., Ahmed, M. M. S., Hossain, N., Islam, M. A., Islam, S. y Rana, M. M. (2023). Tulsi and green tea extracts as efficient green corrosion inhibitor for the corrosion of aluminum alloy in acidic medium. *Results in Engineering*, 17, 100996. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.100996>
- Clark, J. (2023). Genome evolution in plants and the origins of innovation. *New Phytologist Foundation*, 240(6), 2204-2209. <https://doi.org/10.1111/nph.19242>
- Da Costa, M. A. J. L., de Gois, J. S., Toaldo, I. M., Favilla Bauerfeldt, A. C., Batista, D. B., Bordignon-Luiz, M. T., do Lago, D. C. B., Luna, A. S. y de Senna, L. F. (2020). Optimization of espresso spent ground coffee waste extract preparation and the influence of its chemical composition as an eco-friendly corrosion inhibitor for carbon steel in acid medium. *Materials Research*, 23(5), e20190591. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2019-0591>
- De Damborenea, J., Conde, A. y Arenas, M. A. (2014). 3-Corrosion inhibition with rare earth metal compounds in aqueous solutions. En M. Forsyth y B. Hinton (eds.), *Rare Earth-Based Corrosion Inhibitors* (pp. 84-116). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857093585.84>

- Dehghani, A. y Ramezanzadeh, B. (2023). *Rosemary* extract inhibitive behavior against mild steel corrosion in tempered 1 M HCl media. *Industrial Crops and Products*, 193, 116183. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.116183>
- Dillmann, P., Watkinson, D., Angelini, E. y Adriaens, A. (2013). 1 - Introduction: conservation versus laboratory investigation in the preservation of metallic heritage artefacts. En P. Dillmann, D. Watkinson, E. Angelini y A. Adriaens (eds.), *Corrosion and Conservation of Cultural Heritage Metallic Artefacts* (pp. 1-5). EFC Series 65, Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9781782421573.1>
- Eid, S., Syam, S. M., El-Etre, A. Y. y Sayed, N. H. E. (2023). Surface, electrochemical, and theoretical investigation on utilizing olive leaf extract as green Inhibitor for copper corrosion in alkaline environment. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 49(1), 147-164. <https://doi.org/10.1007/s13369-023-07940-4>
- Hermoso-Díaz, I. A., Foroozan, A. E., Flores-De los Ríos, J. P., Landeros-Martínez, L. L., Porcayo-Calderón, J., González-Rodríguez, J. G. (2019). Electrochemical and quantum chemical assessment of linoleic acid as a corrosion inhibitor for carbon steel in sulfuric acid solution. *Journal of Molecular Structure*, 1197, 535-546. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2019.07.085>
- Hermoso-Díaz, I. A., López-Cecenes, R., Flores-De los Ríos, Landeros-Martínez, L. L., Sarmiento-Bustos, E., Uruchurtu-Chavarín, J. y González-Rodríguez, J. G. (2021). Experimental and theoretical studies of α -linolenic acid as green corrosion inhibitor for carbon steel in 0.5 M sulfuric acid. *Molecules*, 26(20), 6169. <https://doi.org/10.3390/molecules26206169>
- Hermoso-Díaz, I. A., Velázquez-González, M. A., Lucio-García, M. A., González-Rodríguez, J. G. (2014). A study of *Salvia hispanica* as green corrosion inhibitor for carbon steel in sulfuric acid. *Chemical Science Review and Letters*, 5(2), 55-64. https://chesci.com/wp-content/uploads/2016/10/V3i11_37_CS05204508.pdf
- Kaczerewska, O., Leiva-Garcia, R., Akid, R., Brycki, B., Kowalczyk, I. y Pospieszny, T. (2018). Effectiveness of O-bridged cationic gemini surfactants as corrosion inhibitors for stainless steel in 3M HCL: experimental and theoretical studies. *Journal of Molecular Liquids*, 249, 1113-1124. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.11.142>
- Kliebenstein, D. J. y Kvitko, B. H. (2023). Better living through phytochemistry: "Phytoavengins" and reappraising the production-focused dichotomy for defensive phytochemicals. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 125, 101978. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2023.101978>
- Koch, G. (2017). 1-Cost of corrosion. En A. M. El-Sherik (ed.), *Trends in oil and gas corrosion research and technologies* (pp. 3-30). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101105-8.00001-2>

- Lavanya, M., Ghosal, J. y Rao, P. (2023). A comprehensive review of corrosion inhibition of aluminium alloys by green inhibitors. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 63(1), 1-11. <https://doi.org/10.1080/00084433.2023.2190198>
- Liao, B., Ma, S., Zhang, S., Li, X., Quan, R., Wan, S. y Guo, X. (2023). Fructus cannabis protein extract powder as a green and high effective corrosion inhibitor for Q235 carbon steel in 1 M HCL solution. *International Journal of Biological Macromolecules*, 239, 124358. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124358>
- Machado Fernandes, C., Pina, V. G. S. S., Alvarez, L. X., de Albuquerque, A. C. F., dos Santos Júnior, F. M., Barrios, A. M., Velasco, J. A. C. y Ponzio, E. A. (2020). Use of a theoretical prediction method and quantum chemical calculations for the design, synthesis and experimental evaluation of three green corrosion inhibitors for mild steel. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 599, 124857. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.124857>
- Méndez, C. M., Gervasi, C. A., Pozzi, G. y Ares, A. E. (2023). Corrosion inhibition of aluminum in acidic solution by *Ilex paraguariensis* (Yerba Mate) extract as a green Inhibitor. *Coatings*, 13(2), 434. <https://doi.org/10.3390/coatings13020434>
- Miralrio, A. y Espinosa Vázquez, A. (2020). Plant extracts as green corrosion inhibitors for different metal surfaces and corrosive media: a review. *Processes*, 8(8), 942. <https://doi.org/10.3390/pr8080942>
- Nazari, A., Ramezanzadeh, B., Guo, L. y Dehghani, A. (2023). Application of green active bio-molecules from the aquatic extract of *Mint* leaves for steel corrosion control in hydrochloric acid (1M) solution: Surface, electrochemical, and theoretical explorations. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 656, 130540. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.130540>
- Pal, A. y Das, C. (2022). New eco-friendly anti-corrosion inhibitor of purple rice bran extract for boiler quality steel: experimental and theoretical investigations. *Journal of Molecular Structure*, 1251, 131988. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2021.131988>
- Putilova, I. N. (1960). *Metallic corrosion inhibitors* (E. Bishop ed.). Pergamon Press.
- Rahmani, M. H., Dehghani, A., Salamati, M., Bahlakeh, G. y Ramezanzadeh, B. (2023). Mango extract behavior as a potent corrosion inhibitor against simulated chloride-contaminated concrete pore solution; coupled experimental and computer modeling studies. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 130, 368-381. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2023.09.040>
- Ribeiro Maestro, C. A. R., de Sousa Malafaia, A. M., Fonseca Silva, C., Soares Nascimento Jr., C. S., Bastos Borges, K., Araújo Simões, T., Rosa Capelossi, V. y Santos Bueno, A. H. (2023). Corrosion resistance improvement of mild steel in different pH using peel garlic

- green inhibitor. *Materials Chemistry and Physics*, 305, 127971. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.127971>
- Saleem, S., UI Mushtaq, N., Shah, W. H., Rasool, A., Hakeem, K. R. y UI Rehman, R. (2022). Beneficial role of phytochemicals in oxidative stress mitigation in plants. En T. Aftab y K. R. Hakeem (eds.), *Antioxidant defense in plants: molecular basis of regulation* (pp. 435-451). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-981-16-7981-0_20
- Salleh, S. Z., Yusoff, A. H., Zakaria, S. K., Taib, M. A. A., Abu Seman, A., Masri, M. N., Mohamad, M., Mamat, S., Ahmad Sobri, S., Ali, A. y Teo, P. T. (2021). Plant extracts as green corrosion inhibitor for ferrous metal alloys: A review. *Journal of Cleaner Production*, 304, 127030. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127030>
- Sastri, V. S. (2012). *Green corrosion inhibitors: theory and practice*. John Wiley & Sons. <http://doi.org/10.1002/9781118015438>
- Shanmugapriya, R., Ravi, M., Sanmugapriya, R., Ramasamy, M., Maruthapillai, A. y Selvi, J. A. (2023). Electrochemical and Morphological investigations of *Elettaria cardamomum* pod extract as a green corrosion inhibitor for Mild steel corrosion in 1 N HCL. *Inorganic Chemistry Communications*, 154, 110958. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.110958>
- Sotelo, O., Henao, J., Vazquez-Velez, E., Poblano-Salas, C. A. y Martinez-Valencia, H. (2023). Corrosion inhibition studies of synthesized oleic sources-based green inhibitors from agro-industrial waste. En *Handbook of Research on Corrosion Sciences and Engineering* (pp. 362–382). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-6684-7689-5.ch013>
- Umoren, S. A., Solomon, M. M. y Saji, V. S. (2020). Corrosion inhibitors for sour oilfield environment (H₂S Corrosion). En I. S. Saji y S. A. Uromen (eds.), *Corrosion inhibitors in the oil and gas industry* (pp. 229-254). Wiley-VCH Verlag. <https://doi.org/10.1002/9783527822140.ch8>
- Verma, D. K., Aslam, R., Aslam, J., Quraishi, M. A., Ebenso, E. E. y Verma, C. (2021). Computational modeling: theoretical predictive tools for designing of potential organic corrosion inhibitors. *Journal of Molecular Structure*, 1236, 130294. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2021.130294>
- Verma, C., Ebenso, E. E., Bahadur, I. y Quraishi, M. A. (2018). An overview on plant extracts as environmental sustainable and green corrosion inhibitors for metals and alloys in aggressive corrosive media. *Journal of Molecular Liquids*, 266, 577-590. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.06.110>
- Verma, C., Lgaz, H., Verma, D. K., Ebenso, E. E., Bahadur, I., y Quraishi, M. A. (2018). Molecular dynamics and Monte Carlo simulations as powerful tools for study of interfacial adsorption behavior of corrosion inhibitors in aqueous phase: a review. *Journal of Molecular Liquids*, 260, 99-120. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.03.045>

- Verma, C., Obot, I. B., Bahadur, I., Sherif, E.-S. M. y Ebenso, E. E. (2018). Choline based ionic liquids as sustainable corrosion inhibitors on mild steel surface in acidic medium: Gravimetric, electrochemical, surface morphology, DFT and Monte Carlo simulation studies. *Applied Surface Science*, 457, 134-149. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.06.035>
- Verma, C. y Quraishi, M. A. (2021). Recent progresses in Schiff bases as aqueous phase corrosion inhibitors: design and applications. *Coordination Chemistry Reviews*, 446, 214105. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2021.214105>
- Verma, C., Quraishi, M. A. y Ebenso, E. E. (2018). Microwave and ultrasound irradiations for the synthesis of environmentally sustainable corrosion inhibitors: an overview. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 10, 134-147. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2018.11.001>
- Verma, C., Quraishi, M. A. y Rhee, K. Y. (2022). Electronic effect vs. molecular size effect: experimental and computational based designing of potential corrosion inhibitors. *Chemical Engineering Journal*, 430, parte 1, 132645. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.132645>
- Vorobyova, V. y Skiba, M. (2021). Peach pomace extract as novel cost-effective and high-performance green inhibitor for mild steel corrosion in NaCl solution: experimental and theoretical. *Waste and Biomass Valorization*, 12(7), 4623-4641. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01333-6>
- Wang, H., Deng, S., Du, G. y Li, X. (2023). Synergistic mixture of *Eupatorium adenophora* spreng leaves extract and KI as a novel green inhibitor for steel corrosion in 5.0 M H₃PO₄. *Journal of Materials Research and Technology*, 23, 5082-5104. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.02.160>
- Wang, Q., Wu, X., Zheng, H., Liu, L., Zhang, Q., Zhang, A., Yan, Z., Sun, Y., Li, Z. y Li, X. (2023). Evaluation for *Fatsia japonica* leaves extract (FJLE) as green corrosion inhibitor for carbon steel in simulated concrete pore solutions. *Journal of Building Engineering*, 63, parte B, 105568. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105568>
- Xiao, L., Sun, Y. y Tsao, R. (2022). Paradigm shift in phytochemicals research: evolution from antioxidant capacity to anti-inflammatory effect and to roles in gut health and metabolic syndrome. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 70(28), 8551-8568. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.2c02326>
- Zhang, Q., Zhang, R., Wu, R., Luo, Y., Guo, L. y He, Z. Y. (2023). Green and high-efficiency corrosion inhibitors for metals: a review. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 37(9), 1501-1524. <https://doi.org/10.1080/01694243.2022.2082746>
- Zlatic, G., Martinović, I., Pilić, Z., Pau, A., Mitar, I., Prkić, A. y Čulum, D. (2023). Green inhibition of corrosion of aluminium alloy 5083 by *Artemisia annua* L. extract in artificial seawater. *Molecules*, 28(7), 2898. <https://doi.org/10.3390/molecules28072>