

Uso de extractos de plantas como inhibidores de corrosión

Plant extracts used as corrosion inhibitors

Recibido 17-08-2014 Aceptado 07-11-2014

Lesly Patricia Tejeda Benítez¹
Pedro Javier Meza Castellar²
Edgar David Altamiranda Percy³
María José Berrocal Bravo⁴

Resumen

Los problemas de la corrosión son frecuentes en la industria química, petrolífera, naval, de construcción civil, en los medios de transporte, los sistemas de comunicación, entre otros. Los inhibidores de corrosión son ampliamente utilizados en el control y prevención de este fenómeno, la mayoría de los compuestos usados para este fin resultan demasiado tóxicos, costosos y dañinos para el medio ambiente y el ser humano. Esta situación ha creado la necesidad de encontrar inhibidores de corrosión que sean ambientalmente amigables y de bajo costo. Los extractos de plantas son biodegradables y representan una fuente renovable de compuestos químicos que poseen un alto potencial como inhibidores. Este artículo ofrece una revisión de la variedad de plantas superiores y algas que han sido utilizadas como inhibidores de corrosión de metales, mostrando el tipo de metal (acero, zinc y aluminio) y las condiciones del medio de exposición (ácido y neutro).

Palabras clave: Inhibidor de corrosión; metales; productos naturales; extractos de plantas.

Abstract

Corrosion problems are common in the chemical, petroleum, naval, civil construction industry, in transportation, communication systems, among others. Corrosion inhibitors are widely used in the control and prevention of this phenomenon; most of the compounds used for this purpose are often too toxic, expensive and harmful to the environment and humans. This has created the need for corrosion inhibitors that are environmentally friendly and inexpensive. The plant extracts are biodegradable and represent a renewable source of chemical compounds that have a high potential as inhibitors. This paper presents a review of the variety of higher plants and algae that have been used as corrosion inhibitors showing the type of metal (steel, zinc and aluminum) and environmental exposure conditions (acidic and neutral).

Keywords: corrosion inhibitor; metals; natural products; plant extracts.

1. Colombiana. Ingeniera Química, Magíster en Ingeniería Ambiental, candidata a doctor en Toxicología Ambiental. Universidad de Cartagena Grupo IDAB ltejedadab@unicartagena.edu.co lptbenitez@gmail.com
2. Colombiano. Ingeniero químico, especialista en Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Magíster en Ingeniería Ambiental. Universidad de Cartagena, Grupo IDAB pmzac@unicartagena.edu.co
3. Colombiano. Ingeniero Químico. Universidad de Cartagena, Grupo IDAB edaltmirandap@gmail.com
4. Colombiana. Ingeniera Química. Universidad de Cartagena, Grupo IDAB majoberrocal@hotmail.com

Introducción

Para obtener metales en forma libre, a partir de los minerales que se encuentran en los yacimientos, el hombre ha creado métodos en los que se consumen grandes cantidades de energía. Los metales y aleaciones producidos con alto contenido energético reaccionan química y electroquímicamente con el medio que los rodea, para formar un compuesto estable lo que conduce a la pérdida del metal, en un proceso conocido como corrosión (Speight, 2014).

En un medio acuoso la corrosión es de naturaleza electroquímica; este fenómeno denota la existencia de una zona anódica (que sufre el deterioro), una zona catódica y un electrolito, y es imprescindible la presencia de estos tres elementos para que el proceso pueda darse (Raja y Sethuraman, 2008).

La corrosión involucra el movimiento de los iones metálicos en la solución, los cuales se desplazan desde las zonas activas del metal (ánodo) hacia un aceptor en zonas menos activas (cátodo), a través del electrolito, causando la dilución y desgaste del material (Abdullah, 2011). Los metales atacados por un medio agresivo pierden la funcionalidad en las aplicaciones para las que son utilizados, por lo que se requiere implementar acciones para control y prevención.

La corrosión afecta la economía, los gastos generados por el control y prevención de este problema son enormes y se estima que corresponden del 2% al 4% del producto interno bruto de un país industrializado (Huu, 2004; Abdel-Gaber *et al.*, 2006). Los riesgos más prominentes, tanto económicos como ambientales y sociales, se presentan en las grandes instalaciones industriales, como centrales eléctricas o plantas de procesos químicos. La corrosión, en muchos casos, es la causante de las paradas de plantas de procesos, disminuye la eficiencia de funcionamiento de los equipos (Abdel-Gaber *et al.*, 2006) y causa accidentes como incendios, explosiones y liberación de productos tóxicos a la atmósfera, al agua o a la tierra (Chen *et al.*, 2008; Restrepo *et al.*, 2009).

La industria en general incurre en costos de mantenimiento preventivo y correctivo debido a los procesos de corrosión en tanques, equipos, tuberías, accesorios y demás. Para evitar estos sobrecostos es útil el uso de inhibidores de corrosión, que evitan o disminuyen la corrosión de los metales. En esta revisión se mencionan particularmente los inhibidores de corrosión que pueden obtenerse a partir de extractos de plantas.

Inhibidores de corrosión

Es casi imposible evitar la corrosión, sin embargo, es posible controlarla. Para precaver el daño por corrosión de tuberías, tanques de mezclado, tubos en espiral, y otras superficies metálicas, la formación de ácidos necesita ser inhibida por el uso de una solución efectiva de inhibidores de corrosión (Finšgar y Jackson, 2014).

Entre los diferentes métodos de prevención y control, el uso de inhibidores de corrosión es ampliamente generalizado, por ser uno de los más rentables y prácticos. El empleo de un inhibidor adecuado puede permitir el uso de acero al carbono de menor grado, lo cual reduce significativamente los costos de capital de un proyecto en comparación con el uso de aleaciones de alto grado en el mismo proyecto (Finšgar y Jackson, 2014).

Los inhibidores son sustancias que al ser agregadas en pequeñas concentraciones en el medio corrosivo, disminuyen o previenen la reacción entre el metal y el medio (Raja y Sethuraman, 2008; Sastri, 2014). Estas sustancias retardan el proceso de corrosión incrementan el comportamiento de la polarización anódica y/o catódica, reducen el movimiento o difusión de los iones hacia la superficie metálica y acrecientan la resistencia eléctrica de la superficie (Satri, 2011). Sin embargo, los inhibidores de corrosión son eficaces sólo para un material metálico en particular en un entorno determinado. Los cambios menores en la composición de la solución o de aleación pueden alterar significativamente la eficacia de la inhibición (Finšgar y Jackson, 2014).

La selección y la cantidad de inhibidor utilizado depende del medio, el tipo de metal, el tiempo de protección deseado, y la temperatura esperada. El límite máximo de temperatura es uno de los papeles clave en la selección del inhibidor, ya que algunos componentes son sensibles a la descomposición térmica, es decir, pierden efectividad de la inhibición. La comunidad científica y la industria no entienden completamente el mecanismo o el papel de los inhibidores y es difícil, a veces imposible, predecir si un compuesto particular funcionará o no. En general, los inhibidores son eficaces para materiales ferrosos sólo a niveles de temperatura por debajo de 121 a 149 °C (Finšgar y Jackson, 2014).

Existen distintas clases de inhibidores como los inorgánicos: sales de cromatos, fosfatos y molibdatos. En este tipo de compuestos los aniones son los responsables de la reducción de la velocidad de corrosión del metal. Los inhibidores orgánicos se utilizan en sistemas de

enfriamiento y comúnmente son de tipo aniónico como el mercaptobenzotiazol (MBT), sulfatos de sodio y fosfonatos (Tansuğ *et al.*, 2014). La Figura 1 muestra los tipos de inhibidores de corrosión de acuerdo con su origen reportados en la literatura.

Los inhibidores que contienen grupo mercapto (-SH) son capaces de formar complejos estables con los iones metálicos a través de la unión tiolato.

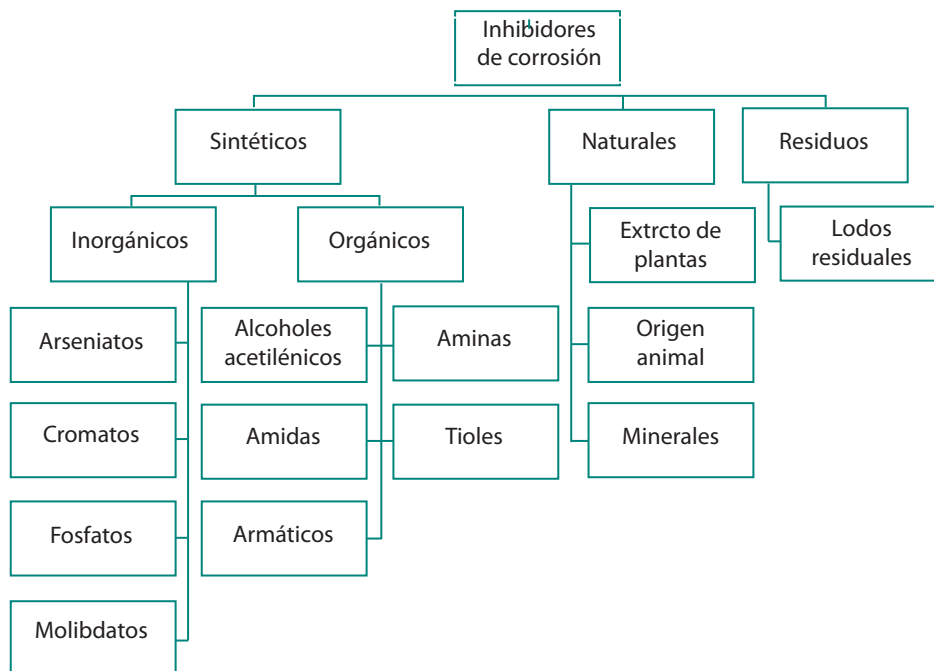


Figura 1. Clasificación de los inhibidores de corrosión de acuerdo con su origen

El ácido de arsénico fue usado como inhibidor de la corrosión en 1932, sin embargo, se sabe que los compuestos de arsénico producen gas arsénico, que es venenoso en condiciones ácidas. En la década de 1970, las sales y ácidos de arsénico fueron reemplazados por moléculas orgánicas, que generalmente contienen nitrógeno, oxígeno, fósforo, grupos aromáticos o alguna insaturación (Finšgar y Jackson, 2014).

Dentro del grupo de inhibidores orgánicos se incluyen alcoholes acetilénicos, aldehídos aromáticos, alquenilfenones, aminas (Quraishi y Jamal, 2001), amidas, imidazoles (Okafor *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2007), nitrilos, sales de iminio, triazoles, piridina y sus derivados, derivados de quinolina, derivados de tiourea, tiosemicarbazida, tiocianatos, entre otros (Finšgar y Jackson, 2014). Los alcoholes acetilénicos son ampliamente utilizados debido a su disponibilidad y bajo costo. Los inhibidores más empleados en la industria de explotación de recursos naturales son el alcohol propargílico y sus derivados, como el cinamaldehído, y compuestos aromáticos como el cloruro de bencilo piridinio cuaternario (Finšgar y Jackson, 2014).

La mayoría de estos inhibidores se modifican con un anillo aromático que tiene ciertos sustituyentes, con el fin de aumentar la hidrofobicidad en la parte superior de la capa protectora. El mecanismo de inhibición se basa en la absorción química de complejo entre iones de inhibidor y el metal en la superficie. La eficiencia de inhibición se rige por la posición del grupo SH en el anillo, siendo orto > meta > para (Tansuğ *et al.*, 2014).

Los compuestos heterocíclicos es decir, aquellos que en el anillo poseen al menos un átomo diferente a carbono –han sido útiles como inhibidores de corrosión (Raja y Sethuraman, 2010) y su síntesis se ha realizado continuamente. La mayoría de estos compuestos contienen nitrógeno, azufre y oxígeno con un par solitario de electrones y adicionalmente poseen sistemas aromáticos (Popova y Christov, 2006). Se cree que en los sitios donde se localizan estos átomos es donde ocurre la adsorción, debido a que pueden actuar en la superficie metálica por medio de adsorción y allí, mediante el bloqueo de los sitios activos, pueden reducir la velocidad de corrosión (Achary *et al.*, 2008; Oguzie *et al.*, 2004; Eddy y Ebenso, 2010). Las moléculas

que contienen nitrógeno y los alcoholes acetilénicos forman además una película sobre la superficie del metal que retarda el proceso de disolución del metal en una reacción anódica, así como la evolución de hidrógeno en la reacción catódica (Barmatov *et al.*, 2012).

Los inhibidores que contienen compuestos azólicos con grupos terminales hidrófobos son muy utilizados. El grupo azol es capaz de formar enlace covalente de coordinación con orbitales *d* vacantes de átomos del metal. También anillos que contienen enlaces conjugados (electrones π) que afectan positivamente las interacciones entre el metal y el compuesto inhibidor (Tansuğ *et al.*, 2014).

La mayoría de los inhibidores sintéticos pueden ser demasiado costosos y peligrosos para los seres vivos debido a su alta toxicidad (Raja y Sethuraman, 2008; Abdullah, 2011). Los inhibidores sintéticos pueden llegar a las aguas naturales y ser distribuidos en los ecosistema afectando especies sensibles a sus componentes (Rizzo, 2004). Algunos inhibidores de tipo orgánico pueden incluso, causar daños a los riñones, al hígado y perturbar los procesos bioquímicos, así como el funcionamiento enzimático en general (Abdallah *et al.*, 2010).

Inhibidores a partir de extractos de plantas.

Los peligros de la mayoría de los inhibidores orgánicos sintéticos se conocen comúnmente y las nuevas legislaciones ambientales, como la Ley de Control de Sustancias Tóxicas de la Environmental Protection Agency (EPA) de los Estados Unidos y la Directiva de Restricción de Sustancias Peligrosas de la Unión Europea, generan la necesidad de desarrollar inhibidores de corrosión ambientalmente amigables, que no contengan metales pesados como el cromo y plomo o compuestos orgánicos. Debido a esta razón se ha sugerido el uso de extractos de plantas como inhibidores de corrosión. La mayoría de los inhibidores naturales no son tóxicos, son biodegradables y son abundantes en la naturaleza. Hasta el momento, ya se han utilizado extractos a partir de semillas, frutas, hojas, flores, etc. (Raja y Sethuraman, 2008; Abdullah, 2011) y se ha encontrado que reducen notablemente la velocidad de corrosión. En los extractos de plantas, están presentes un gran número de compuestos químicos, especialmente heterocíclicos, que inhiben la corrosión de manera eficiente (Sathiyathan *et al.*, 2005; Oladele y Okoro, 2011). El efecto inhibidor se atribuye a la adsorción de estas sustancias orgánicas sobre la superficie del metal, que bloquea los sitios activos o forman una capa protectora (Abdel-Gaber *et al.*, 2006; Singh *et al.*, 2010; Anuradhaa *et al.*, 2008).

Los datos existentes demuestran que la mayoría de

inhibidores orgánicos actúan por adsorción en la interfase metal/solución; mediante el desplazamiento de las moléculas de agua formando una película compacta que funciona como barrera (Abdel-Gaber *et al.*, 2006). La adsorción se ve influenciada por la naturaleza y la carga de la superficie del metal, el tipo de electrolito, la temperatura y la estructura química del inhibidor. De hecho, la interacción específica entre los grupos funcionales, la superficie del metal y heteroátomos como el nitrógeno, oxígeno, azufre y fósforo juegan un papel clave en la inhibición debido a los pares de electrones libres que poseen (Abdullah, 2011). La disponibilidad de pares solitarios y electrones π en las moléculas del inhibidor facilita la transferencia de electrones desde el inhibidor hacia el metal, y forman un enlace covalente coordinado (Chauhan y Gunasekaran, 2007).

En general, los principales tipos de interacción entre un inhibidor orgánico y la superficie del metal, son la quimisorción y/o fisisorción. Se ha sugerido que las moléculas adsorbidas físicamente se unen al metal en cátodos locales y la disolución del metal se retarda cuando se impide la reacción catódica, mientras que las moléculas adsorbidas químicamente protegen las áreas anódicas (Oguzie, 2008).

Inhibición de corrosión del acero dulce

En el acero dulce se ha estudiado ampliamente el uso de inhibidores naturales entre los que se encuentran:

El extracto de *Tagetes erecta*, conocida como Flor de la maravilla, utilizado como inhibidor de corrosión en solución de 0,5 M de H_2SO_4 por medio de gravimetría, polarización potenciodinámica y mediciones espectroscópicas de impedancia electroquímica; el extracto actuó como un inhibidor de tipo mixto, es decir, catódico y anódico; la adsorción del inhibidor en la superficie de acero dulce siguió la isoterma de adsorción de Langmuir, lo que indicó la adsorción monocapa. Los parámetros de activación que rigen la adsorción mostraron que el inhibidor se adsorbió físicamente (Mourya *et al.*, 2014).

El extracto de corteza de patilla se usó como inhibidor de la corrosión de acero dulce en soluciones de HCl y H_2SO_4 . La adsorción siguió el modelo de la isoterma de Temkin. El extracto se comportó como un inhibidor de tipo mixto en ambos medios; siendo el mejor en HCl que en solución de H_2SO_4 (Odewunmi *et al.*, 2014).

Los extractos de fibra de coco en etanol y acetona fueron usados como inhibidores de corrosión de acero dulce en solución de H_2SO_4 0,5 M entre 30 y 60 °C. Se emplearon

técnicas de pérdida de peso y electroquímicas para evaluar la eficacia de inhibición de los extractos, encontrándose que el inhibidor retarda la disolución del acero, pero el efecto fue mayor para el extracto etanólico. La eficiencia de inhibición creció con el aumento de la concentración del extracto pero disminuyó con el aumento de la temperatura, que es sugerente de mecanismo de adsorción física (Umoren *et al.*, 2014).

Los extractos alcohólicos de ocho plantas: *Lycium shawii*, *Teucrium oliverianum*, *Ochradenus baccatus*, *Anvillea garcinii*, *Cassia italica*, *Artemisia sieberi*, *Carthamus tinctorius* y *Tripleurospermum auriculatum* fueron estudiados para evaluar el efecto inhibitorio de la corrosión en el acero dulce en HCl 0,5 M utilizando el potencial de circuito abierto, curvas de polarización y métodos de impedancia de corriente alterna. Todos los extractos de plantas inhibieron la corrosión de acero dulce en medios ácidos, a través de adsorción, y actuaron como inhibidores de tipo mixto (Al-Otaibi *et al.*, 2014).

El efecto de inhibición del extracto de hojas y corteza de *Neolamarckia cadamba* fue investigado en la corrosión de acero dulce en HCl 1,0 M. Las mediciones de polarización potenciodinámica, de impedancia electroquímica, microscopía electrónica de barrido y espectroscopia de FTIR mostraron que los extractos redujeron la velocidad de corrosión significativamente a todas las concentraciones (Raja *et al.*, 2013).

El jugo de durazno ha sido investigado como material anti-corrosivo para el acero dulce en ácido clorhídrico a diferentes temperaturas. El inhibidor fue adsorbido físicamente en la superficie del metal describiendo una isoterma de Langmuir. La eficiencia de la inhibición máxima fue del 91% a 50 °C con una concentración del inhibidor de 50 cm³/l (Yaro *et al.*, 2011).

El efecto inhibitorio del extracto alcaloide de *Rauvolfia serpentina* fue evaluado en acero dulce sumergido en solución ácida. Se halló que la eficiencia de inhibición llegó hasta del 95% en solución de HCl y 96% en solución de H₂SO₄, con una concentración de 50 ppm de inhibidor a una temperatura de 323 K (Raja y Sethuraman, 2010).

Se ha investigado el rendimiento de inhibición de la corrosión de extracto de henna (*Lawsonia inermis*) y sus principales constituyentes (Lawsone, ácido gálico, α -D-glucosa, y ácido tánico) para acero dulce en HCl 1M. El extracto de henna se considera de bajo costo y respetuoso con el medioambiente. Los autores demostraron que este

extracto es eficaz en la prevención de la corrosión, sin embargo, al aumentar la temperatura de 25 a 60 °C, la eficiencia de inhibición disminuyó. Además, probaron que todos los compuestos presentes en el extracto actúan como inhibidores y algunos de ellos también como eliminadores de oxígeno (Ostovari *et al.*, 2009).

El extracto de la planta *Justicia gendarussa* ha sido estudiado como inhibidor de corrosión para acero dulce en HCl 1,0 M a 25-70 °C. Los principales componentes de este extracto son (β -sitosterol), friedelina, lupenol, dímeros fenólicos, aminas aromáticas o-sustituidas, alcohol bencílico, y flavonoides. La eficiencia de inhibición aumentó con la concentración, pero disminuyó con la temperatura. A 80 °C no hay efecto inhibitorio debido a la descomposición de los compuestos del extracto (Satapathy *et al.*, 2009).

Ha sido estudiado el efecto de las diferentes partes de la *Carica papaya*, como inhibidores de corrosión del acero dulce en H₂SO₄. La investigación demostró que la mayor eficiencia de inhibición la tuvieron las hojas con un 85,8% a 30°C. Las eficiencias se incrementaron con la concentración de los extractos y disminuyeron con el aumento de la temperatura (Okafor y Ebenso, 2007).

Inhibición de corrosión del acero al carbono

La inhibición de la corrosión de aceros con mayor porcentaje de carbono ha sido ampliamente investigada. Un surfactante preparado a partir del aceite de semilla de *Adenopus breviflorus* fue aplicado como inhibidor de la corrosión del acero al carbono en HCl 0,5 M a través del método de pérdida de peso. El mecanismo inhibitorio se estudió por las propiedades de la superficie y fotografías de microscopía de barrido electrónico, encontrándose que fue por adsorción. Los resultados presentaron al surfactante preparado como un inhibidor eficaz de la corrosión de acero dulce en HCl 0,5 M (Adewuyi *et al.*, 2014).

El zumo de albaricoque se empleó para inhibir la corrosión de acero al carbono en una solución 1,0 M de H₃PO₄ a diferentes temperaturas, por la técnica de pérdida de peso. Los estudios de adsorción mostraron que el inhibidor adsorbido en la superficie de metal siguió la isoterma de Langmuir; que la velocidad de corrosión está influida por la temperatura, la concentración del inhibidor y la interacción combinada de los dos factores (Yaro *et al.*, 2013).

El extracto de *Euphorbia falcata* L. se evaluó como inhibidor de la corrosión de acero al carbono en HCl 1,0 M usando técnicas gravimétricas, impedancia, polarización y microscopía electrónica de barrido. Los resultados

experimentales muestran que el extracto es buen inhibidor de la corrosión, y la eficacia de la protección se incrementó con la concentración. Los resultados obtenidos a partir de las curvas de polarización indicaron que el extracto es un inhibidor de tipo mixto; que la inhibición de la corrosión del acero al carbono en HCl 1,0 M se controla principalmente por un proceso de fisisorción (El Bribri *et al.*, 2013).

La inhibición de la corrosión del acero al carbono en HCl 1,0 M y 1,0 M de H_2SO_4 por la microalga *Spirulina platensis* se estudió a diferentes temperaturas por el método de pérdida de peso, polarización potenciodinámica, medidas de espectroscopía de impedancia electroquímica y microscopía electrónica de barrido. La eficiencia de inhibición creció con el aumento de la concentración del inhibidor, tanto en HCl como en H_2SO_4 . Los resultados de los estudios de pérdida de peso se correlacionaron bien con los de estudios de impedancia y polarización. Los resultados mostraron que el modo de adsorción fue la fisisorción (Kamal y Sethuraman, 2012).

El extracto de hojas de *Olea europaea* L., conocida como olivo, se usó como inhibidor de la corrosión para superficies de acero en una solución de salmuera. Las características inhibidoras se investigaron mediante impedancia electroquímica (EIS) y curvas de polarización potenciodinámicas. El mecanismo de inhibición de incrustaciones se atribuyó a la formación del complejo de cafeato de calcio, que se adsorbe en la superficie del acero en una etapa temprana, envenenando los núcleos cristalinos alrededor de ellos. Las curvas de polarización potenciodinámicas indicaron que el extracto de hoja de olivo puede inhibir la corrosión del acero y la acumulación de cal (Abdel-Gaber *et al.*, 2011).

El extracto de hojas de Neem se encontró altamente eficiente para inhibir la corrosión del acero al carbono en soluciones de HCl 1,0 M, alcanzando eficiencias de alrededor de 87% a temperatura ambiente, con una concentración de 3g/L del extracto (Nahle *et al.*, 2010).

En el estudio de las características de inhibición y de adsorción del extracto de etanol de *Heinsia crinata* en la corrosión del acero al carbono en soluciones de H_2SO_4 fueron empleadas técnicas de pérdida de peso, termométricas y de evolución del hidrógeno, mientras que las propiedades de adsorción fueron estudiadas mediante espectroscopía IR. La eficiencia de inhibición del extracto varió con la concentración, el período de inmersión y con la temperatura. Las propiedades inhibidoras fueron atribuidas a la presencia de alcaloides, saponinas, taninos, glucósidos cardiacos y antraquinona (Eddy y Odiongenyi, 2010).

El efecto inhibidor del extracto de *Aniba rosaeodora* sobre la corrosión del acero C38 en HCl 1,0 M se estudió usando técnicas de polarización potenciodinámica y espectroscopia de impedancia electroquímica. Los estudios de polarización mostraron que el extracto es un inhibidor de tipo mixto cuya eficacia de inhibición aumentó con la concentración de inhibidor (Chevalier *et al.*, 2014).

Los extractos de hojas de rábano y comino negro fueron puestos a prueba como inhibidores de corrosión de acero al carbono, en presencia de aguas industriales. Los datos obtenidos revelan que el extracto de comino negro es relativamente mejor que el extracto de hojas de rábano, sin embargo, ambas plantas tienen potencial para ser empleadas en la inhibición de corrosión de tuberías de petróleo o gas con grandes contenidos de agua (Badiea y Mohana, 2009).

Se ha reportado que la planta *Aloe vera* posee buenas propiedades inhibidoras mediante quimisorción. Basados en la composición química del aloe, concluyeron que la acción inhibidora del extracto se debe al efecto quelante de sus grupos funcionales con los iones férricos, lo que facilita una fuerte coordinación sobre la superficie del acero en estudio (Eddy y Odoemelum, 2009).

Los extractos de algas *Bifurcaria bifurcata* se han usado en la inhibición de la corrosión del acero al carbono en presencia de HCl 1 M. El proceso de inhibición fue atribuido a la adsorción de moléculas del inhibidor, a la precipitación de quelatos de hierro y a la formación de complejos en la superficie (Abbout *et al.*, 2004).

En el estudio de la aplicación de aceite de Artemisa en la inhibición de corrosión del acero en HCl, la mayor eficiencia de inhibición fue del 76% a una concentración del inhibidor de 19 g/dm³ (Bouyanzer y Hammouti, 2004).

Inhibición de corrosión del acero inoxidable

El extracto de hojas de *Silybum marianum* ha sido evaluado como un inhibidor de la corrosión de acero inoxidable 304 en solución de HCl 1,0 M por medio de mediciones de pérdida de peso, polarización potenciodinámica y espectroscopia de impedancia electroquímica. Las curvas de polarización potenciodinámicas indicaron que el extracto de *S. marianum* se comporta como inhibidor de tipo mixto (Soltani *et al.*, 2014).

La acción de inhibición del extracto de la hoja de *Aloe vera* como protección contra la corrosión del acero inoxidable en solución 1,0 M de H_2SO_4 fue estudiada mediante técnicas electroquímicas y por microscopía de barrido electrónico. Los resultados de polarización lineal y la espectroscopia

de impedancia electroquímica demostraron la eficacia del extracto a medida que aumentó la concentración (Mehdipour *et al.*, 2014).

Inhibición de corrosión de otros metales y aleaciones

El extracto de la planta *Camellia sinensis* fue utilizado para la inhibición de la corrosión de latón en medios ácido y neutro. El extracto disminuyó la velocidad de reacción catódica con más fuerza que la velocidad de reacción anódica. La eficiencia de inhibición aumentó con el tiempo de inmersión. Los inhibidores se adsorbieron fácilmente en la superficie de latón, mediante la formación de una capa inhibidora que evita la corrosión de la superficie (Ramde *et al.*, 2014).

El extracto etanólico de *Mansoa alliacea* fue probado como un inhibidor de la corrosión del zinc en NaCl 3% utilizando las técnicas de polarización y espectroscopia de impedancia electroquímica. Las curvas de polarización potenciodinámicas indicaron que el extracto de la planta se comporta como inhibidor de tipo mixto. Se obtuvieron eficiencias de inhibición del orden del 90%. Las curvas de polarización muestran que el extracto afecta las reacciones anódica y catódica (Suedile *et al.*, 2014).

Las características de inhibición de la corrosión del extracto acuoso de semillas de *Coriandrum sativum* L. fueron estudiadas por Prabhu y Rao (2013) para el control de la corrosión del aluminio en solución 1,0 M de ácido fosfórico usando técnicas de polarización potenciodinámica y espectroscopia de impedancia electroquímica. La adsorción del inhibidor sobre la superficie metálica obedeció a una isoterma de adsorción de Langmuir. Las mediciones de polarización mostraron que el extracto actuó como inhibidor mixto.

Se ha estudiado la inhibición de aluminio en H_2SO_4 0,5 M por extractos de *Spondias mombin* L. utilizando la técnica gravimétrica estándar a 30 - 60 °C. Se empleó la tendencia de la eficiencia de inhibición con la temperatura, para proponer el mecanismo de inhibición. La eficiencia de inhibición del extracto aumentó con la concentración pero disminuyó con la temperatura (Obi-Egbedi *et al.*, 2012).

El aceite de jojoba, aplicado en la inhibición de la corrosión del hierro en ácido clorhídrico, determinó que la velocidad de corrosión disminuyó significativamente en presencia del aceite y que su eficiencia de inhibición se incrementó casi hasta el 100% a una concentración del aceite de 0,515g/L (Chetouani *et al.*, 2004).

Inhibición de corrosión de hormigón armado

La inhibición de la corrosión del hormigón armado se estudió a través del tratamiento con *Bambusa arundinacea*. La mezcla de hormigón se diseñó para una resistencia a la compresión de 30 MPa con una relación de 0,45 agua-cemento. Las muestras se sometieron a prueba de resistencia a la compresión y durabilidad durante 360 días de exposición. La *B. arundinacea* evitó la corrosión en la superficie de acero (Aspitia *et al.*, 2014).

En la Tabla 1 se resumen las investigaciones del 2012-2014 en cuanto a el uso de extractos de plantas como inhibidores de corrosión.

Conclusiones

La preocupación por la conservación del medioambiente y las nuevas legislaciones para controlar la emisión de sustancias tóxicas dañinas para la vida en el planeta, condujo al estudio de los extractos de plantas como inhibidores de corrosión. Dichos extractos se han convertido en fuente importante para el medioambiente, fácilmente disponible y renovable para la amplia gama de inhibidores debido a que son ricas fuentes de ingredientes que tienen alta eficiencia a la inhibición.

En esta revisión se presentaron algunos de los estudios realizados hasta el momento, en los cuales se obtuvieron buenas eficiencias de inhibición en condiciones de estudio. Son muchas las opciones que se pueden explorar a la hora de evaluar si el extracto de una planta es un buen inhibidor, teniendo dado el número de variables en juego: tipo de material, tipo de medio, concentración del medio, temperatura, tiempo de inmersión, origen del extracto, entre otras. El material más estudiado es el acero dulce, debido quizás a su gran aplicabilidad industrial. Los medios más frecuentes en los estudios reportados son las soluciones de HCl y H_2SO_4 de concentración 1,0 M. Las temperaturas usadas en los experimentos se encuentran en el rango de 25 - 60 °C.

En la mayoría de los estudios reportados se encontró que la eficiencia de la inhibición crecía con el incremento de la concentración del inhibidor, pero disminuía al aumentar la temperatura. Debido a los altos porcentajes de eficiencias encontrados, incluso mayores al 90%, los inhibidores a partir de extractos vegetales, son una tecnología emergente con gran potencial para ser utilizada en la protección de los metales contra la corrosión, aventajada por la biodegradabilidad de los extractos, su alta disposición y naturaleza inofensiva con el medio ambiente.

Tabla 1. Investigaciones reportadas del 2012-2014 sobre el uso de inhibidores de corrosión a partir de extractos de plantas.

Planta	Metal	Medio	Referencia
<i>Tagetes erecta</i>	Acero dulce	H ₂ SO ₄ 0,5 M	Mourya <i>et al.</i> , 2014
<i>Silybum marianum</i>	Acero inoxidable 304	HCl 1,0 M	Soltani <i>et al.</i> , 2014
Neem	Acero al carbono	HCl 1,0 M	Nahle <i>et al.</i> , 2010
<i>Bambusa arundinacea</i>	Hormigón armado	Cloruros	Aspitia <i>et al.</i> , 2014
<i>Adenopus breviflorus</i>	Acero dulce	HCl 0,5 M	Adewuyi <i>et al.</i> , 2014
Patilla	Acero dulce	HCl y H ₂ SO ₄	Odewunmi <i>et al.</i> , 2014
Coco	Acero dulce	H ₂ SO ₄ 0,5 M	Umoren <i>et al.</i> , 2014
<i>Aniba rosaeodora</i>	Acero C38	HCl 1,0 M	Chevalier <i>et al.</i> , 2014
<i>Camellia sinensis</i>	Latón	Na ₂ SO ₄ 0.1 M	Ramde <i>et al.</i> , 2014
<i>Lycium shawii</i> , <i>Teucrium oliverianum</i> , <i>Ochradenus baccatus</i> , <i>Anvillea garcinii</i> , <i>Cassia italica</i> , <i>Artemisia sieberi</i> , <i>Carthamus tinctorius</i> y <i>Tripleurospermum auriculatum</i>	Acero dulce	HCl 1,0 M	Al-Otaibi <i>et al.</i> , 2014
<i>Aloe vera</i>	Acero inoxidable	H ₂ SO ₄ 1,0 M	Mehdipour <i>et al.</i> , 2014
<i>Mansoa alliacea</i>	Zinc	NaCl 3%	Suedile <i>et al.</i> , 2014
Albaricque	Acero al carbono	H ₃ PO ₄	Yao <i>et al.</i> , 2013
<i>Coriandrum sativum</i> L.	Aluminio	H ₃ PO ₄ 1,0 M	Prabhu y Rao, 2013
<i>Neolamarckia cadamba</i>	Acero dulce	HCl 1,0 M	Raja <i>et al.</i> , 2013
<i>Euphorbia falcata</i>	Acero al carbono	HCl 1,0 M	El Bribri <i>et al.</i> , 2013
<i>Spirulina platensis</i>	Acero al carbono	HCl 1,0 M y 1,0 M de H ₂ SO ₄	Kamal y Sethuraman, 2012
<i>Spondias mombin</i> L.	Aluminio	H ₂ SO ₄ 0,5 M	Obi-Egbedi <i>et al.</i> , 2012

Fuente: Autores

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la Universidad de Cartagena por su apoyo en la realización de esta investigación.

Referencias

Abdallah, M., Radwan, M., Shahera, Shohayeb, S., Abdelhamed, S. (2010). Use of some natural oils as crude pipeline corrosion inhibitors in sodium hydroxide solutions. *Chem. Technol. Fuels Oils*, 46: 354-362.

Abdel-Gaber, A.M., Abd-El-Nabey, B.A., Sidahmed, I.M., El-Zayady, A.M. y M. Saadawy. (2006). Inhibitive action of some plant extracts on the corrosion of steel in acidic media. *Corros. Sci*, 48: 2765-2779.

Abdel-Gaber, A.M., Abd-El-Nabey, B., Khamis, E., Abd-El-Khalek, D. (2011). A natural extract as scale and corrosion inhibitor for steel surface in brine solution. *Desalination*, 278(1-3): 337-342.

Abdullah, D. (2011). A review: plant extracts and oils as corrosion inhibitors in aggressive media. *Industrial Lubrication and Tribology*, 63 (4) 227-233.

Achary, G., Sachin, H.P., Arthoba Naik, Y. y Vankatesha, T.V. (2008). The corrosion inhibition of mild steel by 3-formyl-8-hydroxy quinoline in hydrochloric acid medium. *Materials Chemistry and Physics*, 107: 44-50.

Adewuyi, A., Göpfert, A., Wolff, T. (2014). Succinyl amide gemini surfactant from *Adenopus breviflorus* seed oil: A potential corrosion inhibitor of mild steel in acidic medium. *Industrial Crops and Products*, 52: 439-449.

Al-Otaibi, M., Al-Mayouf, A., Khan, M., Mousa, A., Al-Mazroa, S., Alkhathlan, H. (2014). Corrosion inhibitory action of some plant extracts on the corrosion of mild steel in acidic media. *Arabian Journal of Chemistry*, 7(3):340-346

- Anuradhaa, K., Vimalab, R., Narayanasamyc, B., Arockia, J., Rajendrand, S. (2008). Corrosion inhibition of carbon steel in low chloride media by an aqueous extract of *hibiscus rosa-sinensis* linn. *Chem. Eng. Commun*, 195: 352-366.
- Asipita, S., Ismail, M., Abd Majid, A., Majid, Z., Abdullah, C., Mirza, J. (2014). Green *Bambusa Arundinacea* leaves extract as a sustainable corrosion inhibitor in steel reinforced concrete. *Journal of Cleaner Production*, 67:139-146.
- Badiea, A. y Mohana, K. (2009). Corrosion Mechanism of Low-Carbon Steel in Industrial. *Journal of Materials Engineering y Performance*, 18 (9):1264
- Barmatov, E., Geddes, J., Hughes, T., Nagl, M. (2012). Research on corrosion inhibitors for acid stimulation, in: NACE, C2012-0001573.
- Bouyanzer, A. y Hammouti B. (2004). A study of anti-corrosive effects of Artemisia oil on steel. *Pigment y Resin Technology*, 33(5):287-292.
- Chauhan, L. y Gunasekaran, G. (2007). Corrosion inhibition of mild steel by plant extract in dilute HCl médium. *Corros. Sci.*, 49:1143-1161.
- Chen, D., Howe, K., Dallman, J., Bruce, C. (2008). Corrosion of aluminium in the aqueous chemical environment of a loss-of-coolant accident at a nuclear power plant. *Corros. Sci.*, 50:1046-1057.
- Chetouani, A., Hammouti, B. y Benkaddour, M. (2004). Corrosion inhibition of iron in hydrochloric acid solution by jojoba oil. *Pigment y Resin Technology*, 33(1): 26-31.
- Chevalier, M., Robert, F., Amusant, N., Traisnel, M., Roos, C., Lebrini, M. (2014). Enhanced corrosion resistance of mild steel in 1 M hydrochloric acid solution by alkaloids extract from *Aniba rosaedora* plant: Electrochemical, phytochemical and XPS studies. *Electrochimica Acta*, 131: 96-105.
- Eddy, N., Ebenso, E. (2010). Corrosion inhibition and adsorption properties of ethanol extract of *Gongronema latifolium* on mild steel in H_2SO_4 . *Pigment and Resin Technology*, 39(2): 77-83.
- Eddy, N., Odoemelam, S. (2009). Inhibition of corrosion of mild steel in acidic medium using ethanol extract of Aloe vera. *Resin and Pigment Technology*, 38(2): 111-115.
- Eddy, N., Odiongenyi, A. (2010). Corrosion inhibition and adsorption properties of ethanol extract of *Heinsia crinata* on mild steel in H_2SO_4 . *Pigm resin technol.*, 39 (5): 288-295.
- El Bribri, A., Tabyaoui, M., Tabyaoui, B., El Attari, H., Bentiss, F. (2013). The use of *Euphorbia falcata* extract as eco-friendly corrosion inhibitor of carbon steel in hydrochloric acid solution. *Materials Chemistry and Physics*, 141(1): 240-247.
- Finšgar, M., Jackson, J. (2014). Application of corrosion inhibitors for steels in acidic media for the oil and gas industry: A review. *Corrosion Science*, 86:17-41.
- Huu, N. (2004). *The inhibition of copper corrosion in aqueous environments heterocyclic compounds*. Tesis de doctorado. Universidad Tecnológica de Queensland.
- Kamal, C., Sethuraman, M. (2012). *Spirulina platensis* – A novel green inhibitor for acid corrosion of mild steel. *Arabian Journal of Chemistry*, 5(2):155-161.
- Mehdipour, M., Ramezanzadeh, B., Arman, S. (2014). Electrochemical noise investigation of Aloe plant extract as green inhibitor on the corrosion of stainless steel in 1 M H_2SO_4 . *Journal of Industrial and Engineering Chemistry, In Press*.
- Mourya, P., Banerjee, S., Singh, M. (2014). Corrosion inhibition of mild steel in acidic solution by *Tagetes erecta* (Marigold flower) extract as a green inhibitor. *Corrosion Science*, 85: 352-363.
- Nahle, A., Abu, I., Abdel, I., Al-Khayat, M. (2010). UAE Neem Extract as a Corrosion Inhibitor for Carbon Steel in HCl Solution. *Int J Corros*, vol 2010
- Obi-Egbedi, N., Obot, I., Umoren, S. (2012). *Spondias mombin* L. as a green corrosion inhibitor for aluminium in sulphuric acid: Correlation between inhibitive effect and electronic properties of extracts major constituents using density functional theory. *Arabian Journal of Chemistry*, 5(3): 361-373.
- Odewunmi, N., Umoren, S., Gasem, Z. (2014). Utilization of watermelon rind extract as a green corrosion inhibitor for mild steel in acidic media. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry, In Press*.
- Oguzie, E., Onuoha, G., Onuchukwu, A. (2004). Inhibitory mechanism of mild steel corrosion in 2M sulphuric acid solution by methylene blue dye. *Mater. Chem. Phys.*, 89: 305-11.

- Oguzie, E.E. (2008). Evaluation of the inhibitive effect of some plant extracts on the acid corrosion of mild steel. *Corros. Sci.*, 50: 2993-2998.
- Okafor, P., Ebenso, E. (2007). Inhibitive action of Carica papaya extracts on the corrosion of mild steel in acidic media and their adsorption characteristics. *Pigm resin technol.*, 36 (8): 134-140.
- Okafor, P., Liu, X., Zheng, Y. (2009). Corrosion inhibition of mild steel by ethylamino imidazoline derivative in CO₂-saturated solution. *Corros. Sci.*, 51:761-768.
- Oladele, S.K. y Okoro, H.K. (2011). Investigation of corrosion effect of mild steel on orange juice. *African. Journal of Biotechnology*, 10(16): 3152-3156.
- Ostovari, A., Hoseinieh, S., Peikari, M., Shadizadeh, S., Hashemi, S. (2009). Corrosion inhibition of mild steel in 1 M HCl solution by henna extract: a comparative study of the inhibition by henna and its constituents (Lawson, Gallic acid, α -D-Glucose and Tannic acid). *Corros. Sci.*, 51:1935-1949.
- Popova, A., Christov, M. (2006). Evaluation of impedance measurements on mild steel corrosion in acid media in the presence of heterocyclic compounds. *Corros. Sci.*, 48: 3208-21.
- Prabhu, D., Rao, P. (2013). Coriandrum sativum L.—A novel green inhibitor for the corrosion inhibition of aluminium in 1.0 M phosphoric acid solution. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 1(4): 676-683.
- Quraishi, M., Jamal, D. (2001) Corrosion inhibition of N-80 steel and mild steel in 15% boiling hydrochloric acid by a triazole compound—SAHMT. *Mater. Chem. Phys.*, 68:283-287
- Raja, P. y Sethuraman, M. (2010). Studies on the Inhibition of Mild Steel Corrosion by Rauvolfia serpentina in Acid Media. *J. Mater. Eng. Perform.* 19:761-766.
- Raja, P., Sethuraman, M. (2008). Natural products as corrosion inhibitor for metals in corrosive media. *Mater Lett.*, 62: 113 -11.
- Raja, P., Qureshi, A., Rahim, A., Osman, H., Awang, K. (2013). Neolamarckia cadamba alkaloids as eco-friendly corrosion inhibitors for mild steel in 1 M HCl media. *Corrosion Science*, 69: 292-301.
- Ramde, T., Rossi, S., Zanella, C. (2014). Inhibition of the Cu65/Zn35 brass corrosion by natural extract of *Camellia sinensis*. *Applied Surface Science*, 307: 209-216.
- Restrepo, C., Simonoff, J., Zimmerman, R. (2009). Causes, cost consequences, and risk implications of accidents in US hazardous liquid pipeline infrastructure. *Int. J. Crit. Infrastruct. Prot.*, (2) 38-50.
- Rizzo, G. (2004). *Investigation of Potential Environmental Impacts due to the use of Phosphate-based Corrosion Inhibitors in the District of Columbia*. United States Environmental Protection Agency.
- Satapathy, A., Gunasekaran, G., Sahoo, S., Amit, K., Rodrigues, P. (2009). Corrosion inhibition by Justicia gendarussa plant extract in hydrochloric acid solution. *Corros. Sci.*, 51:2848-2856.
- Sathiyathan, R., Maruthamuthu, S., Selvanayagam, M., Mohanan, S., Palaniswamy, N. (2005). Corrosion inhibition of mild steel by ethanolic extract of Rinicius communis leaves. *Ind. J. Chem. Tech.*, 12: 356- 360.
- Sastri, V. (2014). 6- Types of corrosion inhibitor for managing corrosion in underground pipelines. *Underground Pipeline Corrosion*, 166-211.
- Singh, A., Ahamad, I., Singh, V. K., Quraishi, M. H. (2010). Inhibition effect of environmentally benign Karanj (*Pongamia pinnata*) seed extract on corrosion of mild steel in hydrochloric acid solution. *J Solid State Electrochem*, 15:1087-1097
- Soltani, N., Tavakkoli, N., Khayat Kashani, M., Mosavizadeh, A., Oguzie, E., Jalali, M. 2014. Silybum marianum extract as a natural source inhibitor for 304 stainless steel corrosion in 1.0 M HCl. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20(5):3217-3227.
- Speight, J. (2014) Chapter 6 - *Corrosion Monitoring and Control*. Oil and Gas Corrosion Prevention. 109-149
- Suedile, F., Robert, F., Roos, C., Lebrini, M. (2014). Corrosion inhibition of zinc by Mansoa alliacea plant extract in sodium chloride media: Extraction, Characterization and Electrochemical Studies. *Electrochimica Acta*. 133: 631-638.

- Tansuğ, G., Tüken, T., Giray, E., Fındıkkıran, G., Sığircık, G., Demirkol, O., Erbil, M. (2014). A new corrosion inhibitor for copper protection. *Corrosion Science*, 84:21-29
- Umoren, S., Solomon, M., Eduok, U., Obot, I., Israel, A. (2014). Inhibition of mild steel corrosion in H₂SO₄ solution by coconut coir dust extract obtained from different solvent systems and synergistic effect of iodide ions: Ethanol and acetone extracts. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2(2):1048-1060.
- Yaro, A., Khadom, A., Ibraheem, H. (2011). Peach juice as an anti-corrosion inhibitor of mild steel. *Anti-Corros. Methods Mater*, 58 (3): 116–124.
- Yaro, A., Khadom, A., Wael, R. (2013). Apricot juice as green corrosion inhibitor of mild steel in phosphoric acid. *Alexandria Engineering Journal*, 52 (1):129-135
- Zhang, G., Chen, C., Lu, M., Chai, C., Wu, X. (2007). Evaluation of inhibition efficiency of an imidazoline derivative in CO₂-containing aqueous solution. *Mater. Chem. Phys.*, 105 :331–340.