

Extractos naturales como inhibidores verdes de la corrosión en el transporte de gas y petróleo

Carolina Pardo Ayala y Andrea Julieth Villamil Mosquera

Trabajo de grado para optar el título de: Ingeniera Metalúrgica

Director

Darío Yesid Peña Ballesteros

Doctor en corrosión

Codirector

Juan Carlos Orozco Agamez

Magister en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales

Bucaramanga

2020

Agradecimientos

A Dios porque su voluntad me permitió llevar a cabo mi formación académica.

A mi familia por ser mi mayor apoyo y motivación en esta carrera de la vida, sin ellos nada de esto hubiera sido posible.

Al profesor Darío por haberme dado la oportunidad de trabajar en este proyecto y ser parte fundamental de mi formación como profesional.

A la selección femenina de futbol sala por darme la oportunidad de ser parte de ella y vivir experiencias únicas que quedarán en mis recuerdos.

A cada uno de los amigos, docentes y administrativos que me ayudaron a crecer como persona.

Andrea Villamil

A mi madre porque con su amor y dedicación forjó la mujer que soy ahora. Brindándome las experiencias necesarias para emprender este nuevo camino.

Al profesor Darío por haber creído en mis capacidades, dándome la oportunidad de ejercer en este proyecto, igualmente por ser partícipe de mi formación académica.

A mí mejor amiga, que cultivó mi personalidad desde el inicio de mi carrera apoyándome y brindándome su paz, siempre con una gran sonrisa.

A la selección de fútbol sala femenino por darme la oportunidad de pertenecer a esa familia, que me fortaleció como ser humano.

A toda mi familia, amigos, compañeros que estuvieron en este camino de mi formación humana y profesional que, con cada conversación, traspasadas, risas enriquecieron mi paso por la universidad, haciendo que fuera mucho más gratificante.

Carolina Pardo Ayala

Contenido

| | Pág. |
|--|-------------|
| Introducción..... | 10 |
| 1. Objetivos..... | 12 |
| 1.1 Objetivo general..... | 12 |
| 1.2 Objetivos específicos..... | 12 |
| 2. Resultados..... | 13 |
| 2.1 Generalidades del transporte de petróleo y gas..... | 13 |
| 2.2 Corrosión interna en tuberías de petróleo y gas..... | 14 |
| 2.2.1 Corrosión por exposición al CO ₂ | 16 |
| 2.2.2 Corrosión por exposición al H ₂ S..... | 16 |
| 2.3 Control de la corrosión interna en tuberías de petróleo y gas..... | 18 |
| 2.4 Inhibidores de Corrosión..... | 19 |
| 2.4.1 Clasificación de los inhibidores de corrosión..... | 20 |
| 2.5 Regulación Ambiental..... | 22 |
| 2.6 Inhibidores verdes..... | 24 |
| 2.6.1 Clasificación de inhibidores verdes de corrosión..... | 24 |
| 2.6.2 Extractos naturales..... | 25 |
| 2.7 Variables que afectan los inhibidores verdes de corrosión..... | 26 |
| 2.8 Investigaciones realizadas acerca de los extractos de plantas como inhibidores verdes..... | 28 |

| | |
|--|----|
| 2.9 Análisis crítico referente a las investigaciones acerca de extractos naturales | 31 |
| 3. Discusión | 34 |
| 4. Conclusiones..... | 38 |
| Referencias Bibliográficas..... | 39 |

Lista de Figuras

| | Pág. |
|--|-------------|
| Figura 1. Celda de corrosión del hierro en presencia de agua | 15 |
| Figura 2. Mecanismo de inhibidores formadores de películas. | 22 |
| Figura 3. Clasificación de inhibidores de corrosión ecológicos. | 25 |
| Figura 4. Distribución de trabajos de investigación realizados sobre productos naturales como inhibidores de corrosión | 26 |
| Figura 5. Interés mostrado por los inhibidores verdes en las últimas décadas respecto al número de publicaciones en ese periodo..... | 28 |

Lista de tablas

| | Pág. |
|--|-------------|
| Tabla 1. Velocidad de corrosión del acero API 5LX-52 en medio salino a diferentes relaciones de CO ₂ y H ₂ S (Temperatura: 70 °C)..... | 18 |
| Tabla 2. Tabla correspondiente a los extractos naturales usados en aceros para tuberías y medios que simulan tales condiciones. | 30 |
| Tabla 3. Investigaciones realizadas sobre extractos naturales para inhibir el acero al carbono en presencia de medios ácidos..... | 31 |

Resumen

Título: Extractos naturales como inhibidores verdes de la corrosión en el transporte de gas y petróleo*.

Autores: Carolina Pardo Ayala, Andrea Julieth Villamil Mosquera**

Palabras Claves: Extractos naturales, inhibidores verdes de corrosión, tuberías, aceros de bajo carbono

Descripción:

Durante las últimas décadas el uso de inhibidores de corrosión convencionales ha ocasionado graves problemas ambientales además de su elevado costo, razón por la cual los gobiernos del mundo han generado una consciencia ecológica que permita reemplazar dichos inhibidores en la industria del petróleo y gas. En consecuencia, se hace necesario el uso de inhibidores verdes como una alternativa para mitigar la corrosión al interior de las tuberías de transporte. A partir de una revisión conceptual de textos científicos, en este trabajo se determinaron los medios corrosivos presentes en las tuberías como el H₂S y el CO₂ que afectan los aceros al carbono. De igual manera, se identificaron los extractos naturales como los recursos verdes más estudiados en esta área de investigación y sus variables que afectan directamente la eficiencia de estos, como la concentración, la temperatura y el tiempo de exposición. Por lo tanto, el proyecto se enfocó en tales variables y las investigaciones realizadas en los medios presentes al interior de las tuberías. Finalmente, se llevó a cabo un análisis y una síntesis de la información por medio de una crítica constructiva a los estudios revisados como mejora para futuras investigaciones, donde posteriormente se pudo concluir que los extractos naturales emergerán como inhibidores verdes en un futuro si se presta más atención a la buena reproducibilidad de dichos estudios para llevarlos a escala industrial.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director: Darío Yesid Peña Ballesteros, Doctor en corrosión. Codirector: Juan Carlos Orozco Agamez.

Abstract

Title: Natural extracts as green corrosion inhibitors in oil and gas transportation*.

Authors: Carolina Pardo Ayala, Andrea Julieth Villamil Mosquera**

Keywords: Natural extracts, green corrosion inhibitors, pipelines, low carbon steels

Description:

During the last decades the use of conventional corrosion inhibitors has caused serious environmental problems in addition to their high cost. Which is why the governments of the world have generated an ecological conscience that allows them to replace those inhibitors in the oil and gas industry. Consequently, it is necessary to use green inhibitors as an alternative to mitigate corrosion inside transport pipes. Based on conceptual reviews of scientific texts in this subject, the corrosive media present in the pipes such as H₂S and CO₂ that affect carbon steels were determined. Likewise, natural extracts were identified as the most studied green resources in this research area and their variables that directly affect their efficiencies, such as concentration, temperature and exposure time. Therefore, the project focused on such variables and the investigations carried out in the materials present inside the pipes. Finally, an analysis and a synthesis of the information was conducted through a constructive criticism of the studies carried out as an improvement for future research, where it was later possible to conclude that natural extracts will emerge as green inhibitors in the future if the good reproducibility of these studies is taken in consideration to an industrial scale.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Adviser: Darío Yesid Peña Ballesteros. PhD in Corrosion. Codirectress: Juan Carlos Orozco Agamez.

Introducción

La corrosión se ha catalogado como un fenómeno de gran importancia debido a los daños que ha causado en diferentes industrias, en especial la industria de gas y petróleo. Gran parte de los problemas de corrosión se enfocan en el área de transporte por tuberías, estos daños son generados debido a sustancias como el CO₂ y el H₂S que se encuentran al interior de las tuberías, lo que conlleva a grandes costos de corrosión. Se estima que aproximadamente el costo mundial anual agregado de la corrosión es de \$1.372 billones, indicando el total de costos de superficie de las tuberías y de instalación (\$589 millones), costos de tuberías del fondo del pozo (\$463 millones) y gastos de capital (\$320 millones) (Kausalya & Hazlina, 2020).

Uno de los métodos contra la corrosión más utilizado en la industria de gas y petróleo son los inhibidores de corrosión, que aplicado en pequeñas cantidades puede prevenir este problema. Normalmente en las industrias se usan inhibidores tradicionales debido a su alta eficiencia, sin embargo, estos pueden resultar demasiado tóxicos y costosos. Esto ha llevado a que diferentes países generen una mejora ecológica, buscando nuevas alternativas que lleven a la preservación del medio. El uso de inhibidores verdes ha sido acogido de buena manera debido a sus propiedades anticorrosivas y además por su bajo costo. Los extractos naturales como uno de los inhibidores verdes más estudiados, son altamente efectivos y presentan constituyentes fundamentales como las tininas, aminoácidos, alcaloides y pigmentos, los cuales muestran excelentes comportamientos inhibitorios (Becerra, Erika; Guadrón, 2011). Teniendo en cuenta lo anterior, en el presente proyecto se realiza una revisión bibliográfica sobre los extractos naturales como inhibidores verdes

de la corrosión en la industria de gas y petróleo, presentando así esta solución como una técnica competente para la mitigación de la corrosión en las tuberías de transporte.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Estudiar el uso de extractos naturales como una alternativa para la mitigación de la corrosión en el transporte de gas y petróleo por medio de una revisión bibliográfica.

1.2 Objetivos específicos

Analizar el efecto de la concentración sobre la eficiencia de los extractos naturales como inhibidores verdes de corrosión en tuberías de acero al carbono a través de un estudio conceptual.

Determinar la influencia del tiempo de exposición y la temperatura sobre la velocidad de corrosión en el interior de las tuberías de transporte de gas y petróleo.

Analizar de manera crítica las investigaciones y definir la posibilidad de utilización de los extractos naturales como inhibidores de corrosión en el transporte de gas y petróleo.

2. Resultados

2.1 Generalidades del transporte de petróleo y gas

El petróleo y el gas natural son las fuentes de energía más importantes de la sociedad actual (For et al., 2019). La etapa del transporte en la industria del gas y petróleo es relevante desde la boca del pozo hasta los sitios de almacenamiento y procesamiento, como las estaciones de bombeo, refinerías y los centros de comercialización también conocidos como puertos (Ministerio de Ambiente, 2014). Para el transporte de hidrocarburos se utilizan diferentes mecanismos diseñados para una función en particular. En el caso del gas natural, este es transportado por tuberías de acero al carbono de elevada elasticidad conocidas como gasoductos (Talara, 2012). Para el caso del transporte del crudo, se utilizan tres medios diferentes: los carrotanques, los buques y los oleoductos, siendo estos últimos de gran utilidad desde el campo productor hasta el punto de refinación y/o embarque, debido a que el paso inmediatamente posterior al descubrimiento y explotación de un yacimiento es su debido traslado con destino a los centros de refinación o a los puertos de embarque con destino a la explotación (UPME, 2005). Los oleoductos consisten en una red de tuberías de largos trayectos, las cuales pueden ir sobre la superficie terrestre o bajo tierra en las zonas urbanas o sensibles al medio ambiente. Estas tuberías generalmente tienen un diámetro interno de entre 30 y 120 centímetros y dentro de ellas, el petróleo se mantiene en movimiento a una velocidad que oscila entre 1 y 6 metros por segundo, debido a un sistema compuesto por estaciones de bombeo, los cuales se encuentran a lo largo del conducto (Físicas, 2008). Así mismo,

el transporte de combustibles y productos terminados desde las refinerías hasta los centros de distribución y consumo masivo se da a través de poliductos (Demoya, 2006). Estas tuberías, encargadas del transporte de los hidrocarburos nombrados anteriormente, se encuentran en contacto generalmente de agua libre y también de la existencia de especies como CO_2 , H_2S , ácidos orgánicos, etc. (M.A Bodude, 2015).

Las redes de tuberías en la industria del petróleo y gas están hechas generalmente de acero de bajo carbono o acero dulce. Los aceros API conocidos por sus siglas en inglés como HSLA (High Strength Low Alloy) son de gran utilidad en la construcción de tuberías por la presencia de elementos como vanadio, niobio y titanio, los cuales aportan mejoras en las propiedades mecánicas del acero (Didiere et al., 2018).

2.2 Corrosión interna en tuberías de petróleo y gas

Los ductos se ven gravemente afectados en su interior por la presencia de sustancias como dióxido de carbono (CO_2) y sulfuro de hidrógeno (H_2S) dentro de los fluidos que se transportan, los cuales aceleran el proceso de corrosión del acero de baja aleación (Adames-montero et al., 2017). La presencia de CO_2 y H_2S se debe al uso de técnicas de recuperación, las cuales se basan en inyecciones de gases que contienen esos dos compuestos químicos y también a la producción de gas dulce de altas profundidades (Fuentes & Peña, 2007).

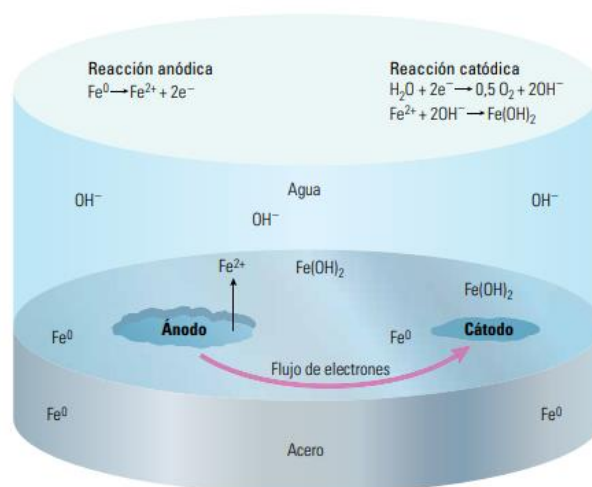
La presencia de agua también es un factor relevante en el proceso de oxidación de los conductos; el hierro que está presente en el acero, libera electrones para formar iones ferrosos (Fe^{2+}) y férricos (Fe^{3+}), los cuales actúan como el ánodo. Estos electrones que están siendo liberados del ánodo son transportados hacia el cátodo, donde, en presencia de oxígeno, se forman

óxido ferroso (FeO) y óxido férrico (Fe_2O_3) a manera de precipitados o incrustaciones de herrumbre. También en el cátodo, los electrones reaccionan con el agua formando iones hidroxilo (OH^-), estos iones se combinan con los iones ferrosos solubilizados y forman hidróxido de hierro [$\text{Fe}(\text{OH})_2$] como se puede ver en la Figura 1.

A su vez, en presencia de oxígeno, el hierro también puede reaccionar con el CO_2 para formar carbonato ferroso (FeCO_3) y con el H_2S formando sulfuros de hierro (Fe_xS_x). En ausencia de oxígeno, la reacción catódica podría generar hidrógeno como gas (Bruce Mackay et al., 2016). El dióxido de carbono y el sulfuro de hidrógeno se disuelven en agua para formar dichos ácidos débiles los cuales son corrosivos para el acero al carbono de oleoductos y gasoductos (Fuentes & Peña, 2007).

Figura 1.

Celda de corrosión del hierro en presencia de agua



Nota. Adaptado de (Bruce Mackay et al., 2016)

A continuación, se presenta de manera más detallada los tipos de corrosión al interior de las tuberías de transporte de gas y petróleo.

2.2.1 Corrosión por exposición al CO₂

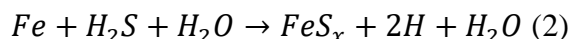
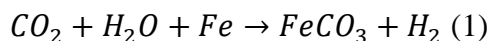
La corrosión producida por el CO₂, también conocida como corrosión dulce, es un tipo de corrosión que se da principalmente en las paredes internas de la tubería. Este tipo de corrosión comienza con la disolución del CO₂ gaseoso en la fase líquida para formar algunas especies como el ácido carbónico (H₂CO₃), el carbonato ferroso (FeCO₃), iones bicarbonato (HCO₃⁻), iones carbonato (CO₃⁻) y el gas hidrógeno (H₂), todo esto como productos de las reacciones catódicas (Bruce Mackay et al., 2016; Fuentes & Peña, 2007). La formación de CO₂ (ac), es decir, en disolución, disminuye el pH, lo cual resulta agresivo al metal causando pérdida rápida del espesor cuando las tuberías se corroen. Cabe resaltar que el CO₂ gaseoso cuando entra en contacto con el agua, se disuelve en una concentración proporcional a la presión parcial del CO₂ disuelto en el gas (Adames-montero et al., 2017). Una característica de la corrosión causada por CO₂ es la picadura, la cual se presenta como hoyos afilados y profundos (Kausalya & Hazlina, 2020).

2.2.2 Corrosión por exposición al H₂S

Este tipo de corrosión también se conoce como corrosión ácida, en la cual se presenta una disolución del H₂S en agua, medio en el cual el sulfuro de hidrógeno pasa a ser corrosivo. Este ácido se encuentra en los fluidos producidos o también como resultado de la corrosión microbiana (MIC) dada por bacterias sulfatoreductoras, las cuales transforman los sulfatos en

ácido sulfhídrico (H_2S) (Monroy Cruz, 2014). El sulfuro de hidrógeno reacciona con el hierro del acero para formar distintas variantes del sulfuro de hierro (Fe_xS_x), tales como la mackinawita [$Fe, Ni)_{(1+x)}S$], la pirrotita [$Fe_{(1-x)}S$] y la troilita [FeS], las cuales pueden formar celdas de corrosión microgalvánicas localizadas (Bruce Mackay et al., 2016). También se pueden formar iones hidrosulfuro, iones sulfuro (S^-) y iones H^+ que toman parte en la transferencia de electrones en la interfaz del metal (Fuentes & Peña, 2007). A su vez, el H_2S puede ser la raíz de las fallas de agrietamiento por corrosión bajo tensión de sulfuro (SSCC) que se da en las tuberías (Kausalya & Hazlina, 2020).

En los ambientes de producción de gas y petróleo, especialmente en el interior de las tuberías, uno de los parámetros más importantes que controlan tal proceso son las concentraciones de CO_2 y H_2S en fase gaseosa, así como otras variables tales como la presión, la temperatura del sistema, la presencia de sólidos, las propiedades de la escama producto de la corrosión, el comportamiento de la fase y la velocidad de flujo, el régimen de flujo de dos fases, el pH del medio, las características del material y las concentraciones de los iones inorgánicos en el agua de la formación (Fuentes & Peña, 2007). El dióxido de carbono y el sulfuro de hidrógeno se combinan con el agua y con el hierro del acero de tuberías para formar de manera general las siguientes reacciones respectivamente:



Comúnmente, la corrosión relacionada con el H_2S es más agresiva que la corrosión provocada por CO_2 . El sulfuro de hidrógeno o ácido sulfhídrico al tener contacto con el agua se convierte en un ácido débil y, por lo tanto, es una fuente rica en iones hidrógeno. Por otra parte, el

dióxido de carbono, cuando entra en contacto con el agua produce ácido carbónico, el cual hace que el fluido sea ácido (Bray et al., 2009).

Los resultados de una investigación que comparaba un acero API 5LX-52 en presencia de estos dos medios arrojaron que la velocidad de corrosión en H₂S fue mayor que en CO₂, así como también en una mezcla de ambos para un oleoducto dado como se puede ver en la tabla 1. Este resultado pudo ser producto de la solución salina a la que fue expuesta (NaCl 3.5%) y variables como la temperatura (70 °C). El CO₂ es un óxido ácido mientras que el H₂S es un ácido que al estar en disolución acuosa en presencia de cloruros, exhibe dos constantes de ionización, razón por la cual muestra mayor agresividad que el CO_{2(ac)} disuelto lo que genera a su vez un incremento significativo en el índice de corrosión (Adames-montero et al., 2017).

Tabla 1.

Velocidad de corrosión del acero API 5LX-52 en medio salino a diferentes relaciones de CO₂ y H₂S (Temperatura: 70 °C).

| Ensayos | Relación H ₂ S/CO ₂ | Velocidad de corrosión (mm/año) |
|---|---|---------------------------------|
| CO ₂ | 0/833 | 0,3353 |
| H ₂ S | 300/0 | 0,4064 |
| Mezcla H ₂ S y CO ₂ | 300/833 | 0,3632 |

Nota. Adaptado de (Adames-montero et al., 2017)

2.3 Control de la corrosión interna en tuberías de petróleo y gas

En la actualidad existen diferentes métodos para controlar, disminuir y prevenir la corrosión metálica (García Inzunza, 2014). Las tuberías utilizadas en el transporte de gas y petróleo generalmente de aceros al carbono sufren distintos eventos que pueden derivar incidentes fatales,

por tal razón el implemento de métodos de control de la corrosión se hace necesario para contribuir a la seguridad y salud del personal, evitar contaminación ambiental y disminuir costos. Los métodos comúnmente usados para el control de la corrosión de ductos son los revestimientos, la protección catódica y los inhibidores de la corrosión, siendo estos últimos de mayor importancia en la industria petrolera (Ismail A, 2019; Umoren S, 2016).

Los revestimientos ofrecen una resistencia química, mecánica y térmica; para una mayor eficiencia esta debe tener una buena adhesión a la superficie a proteger. Por otro lado, la protección catódica es un método que reduce la corrosión metálica por medio de corriente eléctrica (García Inzunza, 2014). Otra importante línea de defensa contra la corrosión es la de los inhibidores, el cual es un método moderno que actualmente se ha estado utilizando en gran medida en la industria de petróleo y gas. A continuación, se habla de forma más detallada de los inhibidores de corrosión.

2.4 Inhibidores de Corrosión

Un inhibidor de corrosión es un aditivo que fija o cubre la superficie metálica formando una película protectora que hace que se evite la corrosión en el material metálico (Becerra, Erika; Gualdron, 2011). Los inhibidores tienen como principal objetivo, interrumpir el proceso electroquímico que forma una celda entre el metal y los líquidos presentes alrededor. Además, pueden ser agregados en numerosos puntos una vez el fluido ingrese a la línea de conducción en las tuberías (Eden et al., 2004). Normalmente las industrias han optado por el uso de inhibidores como aminoácidos, siendo los compuestos que contienen heteroátomos (N, C, P, O) los más eficientes. Los inhibidores orgánicos que contienen -OH, -COOH, NH₂ también son excelentes inhibidores en medios ácidos. (Agraje et al., 2019).

La industria de gas y petróleo tiene un gran problema con la corrosión debido a sustancias como el H_2S y CO_2 , en las tuberías de transporte (Biomorgi, y otros, 2012). Los inhibidores han llegado a ser importantes para estas industrias debido a que es un método flexible y económicamente viable para combatir este fenómeno (Bruce Mackay et al., 2016). Entre los inhibidores comúnmente usados para tratar estas sustancias en las tuberías y que son efectivos para proteger al acero se encuentran los imidazolinas, aminas y compuestos de amonio cuaternario (Eden et al., 2004).

2.4.1 Clasificación de los inhibidores de corrosión

Los inhibidores se clasifican según 4 categorías principales, en las que se encuentran los secuestradores de oxígeno, que se utilizan generalmente en operaciones en las cuales el oxígeno es una amenaza corrosiva. Estos agentes además de reducir la corrosión oxidante también controlan el crecimiento de microbios que utilizan el oxígeno para formarse. En la industria de gas y petróleo, los secuestradores más utilizados son el sulfito de sodio, el dióxido de azufre, el bisulfito de sodio y de amonio. Por otro lado, están los secuestradores de ácido sulfhídrico que se encargan de reducir los niveles de H_2S presente en la corriente de flujo. Entre estos se encuentran, las aminas, los aldehídos y los carboxilatos de zinc (Bruce Mackay et al., 2016). Los agentes reactivos se adhieren a la superficie metálica evitando que el oxígeno entre en contacto con el metal, de igual forma evitan la evolución del H_2 . Algunos ejemplos de estos agentes son las formas de carbonato de calcio, carbonato de magnesio y óxidos de hierro (Bruce Mackay et al., 2016).

Los inhibidores en fase vapor controlan principalmente la corrosión con CO_2 , neutralizándolo y bloqueando la formación de ácido carbónico. Estos son transportados a través de la fase vapor y los más utilizados son la morfina y la etilendiamina (Bruce Mackay et al., 2016).

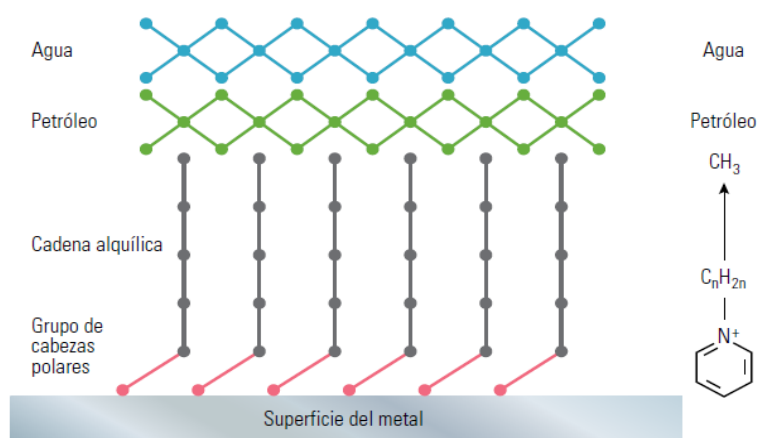
Por último, se encuentran los formadores de películas, que son los inhibidores de corrosión más utilizados en la industria de petróleo y gas. Estos se encargan de crear una capa continua entre el metal y los fluidos reactivos, reduciendo el ataque corrosivo como se muestra en la figura 3. Estas sustancias reducen el índice de corrosión, ya que son eficaces para controlar la corrosión por CO_2 y H_2S . Estos inhibidores adoptan diferentes formas como inhibidores solubles en petróleo, solubles en agua y solubles en petróleo dispersables en agua, también están los inhibidores compuestos de largas cadenas de carbono con nitrógeno, ésteres de fosfatos o anhídritas. Entre los inhibidores formadores de películas más eficaces se encuentran los que generan un enlace molecular en la superficie del metal en un proceso de transferencia de cargas (Bruce Mackay et al., 2016).

Otra clasificación para los inhibidores de corrosión es referente a su biodegradabilidad, los cuales pueden ser orgánicos e inorgánicos, donde los primeros controlan la corrosión con técnicas de adsorción formando una capa protectora entre la superficie metálica y el ambiente corrosivo, con el fin de retrasar el proceso de corrosión del metal. Los inorgánicos controlan la velocidad de corrosión al reaccionar con las partes catódicas o anódicas del proceso en cuestión, tienen la ventaja de ser eficientes a altas temperaturas durante periodos largos y ser más económicos que los orgánicos, sin embargo, son más probables de perder su adherencia en soluciones ácidas fuertes como el ácido clorhídrico al 17% y pueden liberar gases tóxicos como productos de corrosión (Umoren S, 2015; Tiu B & Advincula, 2015; Kausalya & Hazlina, 2020).

En la industria de gas y petróleo se utilizan generalmente los inhibidores orgánicos, ya que pueden ser solubles en agua o petróleo y son formadores de películas, los cuales protegen incluso bajo la presencia de hidrocarburos. Entre los inhibidores orgánicos formadores de películas que resultan más efectivos se encuentran las amidas y las imidazolinas, generalmente en ambientes de corrosión dulce y ácida (Bruce Mackay et al., 2016).

Figura 2.

Mecanismo de inhibidores formadores de películas.



Nota. Adaptado de (Bruce Mackay et al., 2016)

2.5 Regulación Ambiental

La mayoría de los inhibidores de corrosión que se utilizan industrialmente resultan demasiado costosos y tóxicos para el medio ambiente y el ser humano. A partir de esto se ha generado una conciencia ecológica que a su vez lleva a la necesidad de encontrar inhibidores de corrosión que sean ambientalmente amigables y económicos (Tejeda Benítez, 2014).

En muchos lugares del mundo se han implementado estrictas normativas medioambientales, especialmente en las instalaciones de producción de petróleo y gas en el Mar del Norte, donde se tiene como requerimiento un perfil ambiental verde (W. Y. Mok, A. E. Jenkins, 2005).

Se han presentado convenios como OSPAR (Convenio de Oslo y París), en donde se protege el medio ambiente marino del atlántico nororiental. Los productos químicos deben estar sujetos a requisitos armonizados de preselección utilizando el conjunto de datos del Formato de Notificación de Sustancias Químicas Marinas Armonizadas (HOCNF), el cual debe proporcionarse de manera individual para cada sustancia. Los productos químicos pasan por una evaluación previa donde se tienen en cuenta criterios como toxicidad, biodegradación y bioacumulación. En este convenio de igual manera se presenta una lista de sustancias utilizadas y vertidas al mar. Las sustancias que presentan poco o ningún riesgo se denominan verdes, las sustancias que pasan la preselección se denominan amarillos y los que no superan la preselección se denominan rojo o negro dependiendo del nivel de falla. También se ha requerido clasificar los productos químicos según su cociente de riesgo calculado (HQ) que relaciona la concentración ambiental prevista con la concentración prevista sin efecto, donde si $HQ > 1$, puede generar efectos ambientales dañinos (W. Y. Mok, A. E. Jenkins, 2005).

En otras partes del mundo, los peligros que acarrea el uso de estos inhibidores tradicionales se han tenido en cuenta en las nuevas legislaciones ambientales, como la Ley de Control de Sustancias Tóxicas de Environmental Protection Agency (EPA) de los Estados Unidos y la Directiva de Restricción de Sustancias Peligrosas de la Unión Europea (Didiere et al., 2018; Eden et al., 2004). Estas legislaciones llevan a la generación de nuevos inhibidores de corrosión que sean amigables con el ambiente.

2.6 Inhibidores verdes

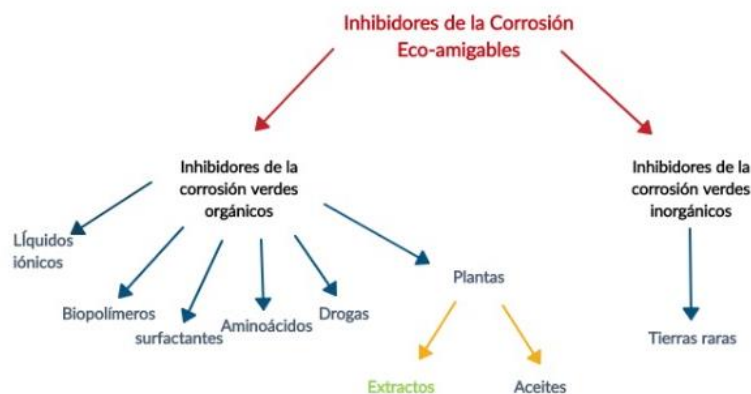
Un inhibidor verde, al igual que un inhibidor industrial, es una sustancia o combinación de sustancias que cuando se agrega en concentraciones bajas a un ambiente para tratar la superficie metálica, disminuye el proceso corrosivo. El término “verde” o “ecológico”, hace referencia a las sustancias que tienen biocompatibilidad en la naturaleza (Kesavan et al., 2012). Los inhibidores verdes son la nueva tendencia en esta línea de investigación. Son considerados ecológicos debido a que presentan poca o nula contaminación para el ambiente (Agraje et al, 2019).

2.6.1 Clasificación de inhibidores verdes de corrosión

Los inhibidores verdes también pueden ser agrupados en dos categorías, orgánicos o inorgánicos. Dentro de los inhibidores verdes orgánicos se encuentran los flavonoides, alcaloides y productos naturales obtenidos de fuentes naturales como plantas (Raja PB, 2008). También se encuentran algunos compuestos sintéticos que tienen una toxicidad muy mínima (Kesavan et al., 2012). Dentro de este grupo están más generalmente los líquidos iónicos, biopolímeros, tensioactivos, aminoácidos, medicamentos y productos obtenidos a partir de plantas tales como los aceites esenciales y los extractos naturales. En la segunda categoría, es decir, dentro de los inhibidores verdes inorgánicos se encuentran las tierras raras. Lo anterior se puede ver ilustrado en la figura 4.

Figura 3.

Clasificación de inhibidores de corrosión ecológicos.



Nota. Adaptado de (Kesavan et al., 2012)

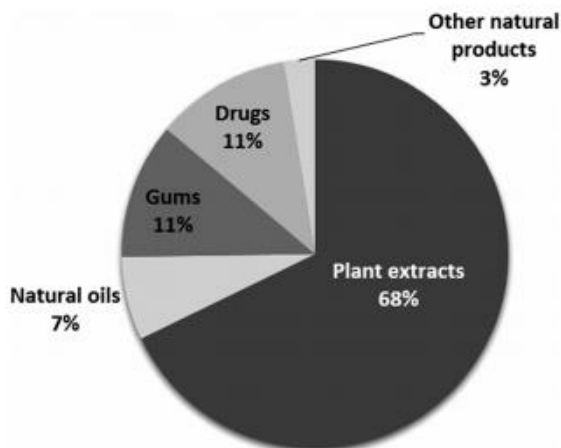
2.6.2 Extractos naturales

Los extractos naturales de plantas encabezan la lista en investigaciones realizadas en las últimas dos décadas como se puede apreciar en la figura 5. Estos tienen características de ser ecológicos, no tóxicos y de fácil disponibilidad. Además, contienen compuestos orgánicos que poseen átomos polares como O, N, P y S, los cuales se adsorben en la superficie metálica por medio de estos átomos y forman películas protectoras (Al, 2011).

Los extractos naturales son eficientes a la hora de inhibir un metal o aleación de la corrosión, debido al aprovechamiento de sus propiedades, por ejemplo, la hoja es de mayor preferencia ya que posee una gran cantidad de fitoquímicos (componentes activos) actuando de igual forma que los inhibidores comerciales. Otras partes de la planta como la raíz, la corteza, la flor, la fruta, la madera, la semilla y la cascara también contribuyen de manera positiva a la eficiencia de inhibición pero lo hacen en menor proporción (Kausalya & Hazlina, 2020).

Figura 4.

Distribución de trabajos de investigación realizados sobre productos naturales como inhibidores de corrosión



Nota. Adaptado de (Xhanari et al., 2017)

2.7 Variables que afectan los inhibidores verdes de corrosión

Los inhibidores verdes de corrosión poseen diferentes elementos naturales dando la característica de inhibición. Los extractos naturales presentan una gran cantidad de compuestos químicos, en especial los heterocíclicos, revelando una gran eficiencia de inhibición (Ananda Louise Sathiyathan et al., 2005), no obstante, estos inhibidores están relacionados con ciertos factores como concentración, tasa de corrosión, temperatura, persistencia de la película, pH, régimen de flujo y composición del fluido, así como la presencia de inestabilidades capaces de perturbar el flujo minimizando la corrosión (Kausalya & Hazlina, 2020).

Se han realizado diversos estudios de extractos naturales principalmente de extractos de plantas, los cuales han presentado muy buenos resultados como inhibidores de corrosión. En la mayoría de los estudios reportados se encontró que la eficiencia de la inhibición crecía con el

incremento de la concentración del inhibidor, sin embargo, esta disminuía al aumentar la temperatura (Tejeda Benítez et al., 2014). En la mayoría de las revisiones, se estudia la concentración del inhibidor, la temperatura y el tiempo de exposición como variables independientes.

En un estudio se evaluó la cascara de huevo como inhibidor de la corrosión, donde la eficiencia de inhibición aumentaba con el aumento de la concentración del inhibidor, de igual forma esto llevó a una baja tasa de corrosión. Por otro lado, la temperatura influyó de manera negativa, al aumentar la temperatura la velocidad de corrosión también va a aumentar, esto se debe a que, al tener mayor temperatura, la energía dinámica de las moléculas de la cascara de huevo aumenta, haciendo que se ralentice la película protectora sobre la superficie (Sanni et al., 2019).

Se realizó un estudio de pérdida de peso, en el cual, con el aumento de la concentración, se disminuyó los valores de pérdida de peso y la velocidad de corrosión, sin embargo, se logró percibir que, se llega a un punto donde la concentración del inhibidor no tiene influencia notable sobre la eficacia del inhibidor (Sanni et al., 2019).

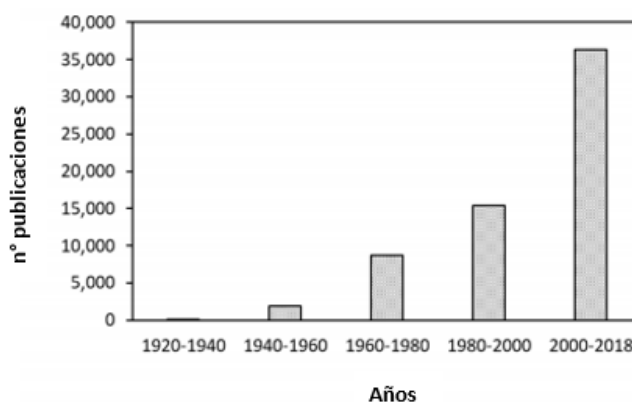
A medida que el inhibidor está expuesto al ambiente corrosivo por un tiempo prolongado, este va perdiendo o ganando su efectividad durante el proceso de inhibición de corrosión. Al evaluar la eficiencia de inhibición con el tiempo, es posible evidenciar la estabilidad del comportamiento del inhibidor verde en la escala del tiempo (Kesavan et al., 2012). Normalmente la eficiencia de inhibición disminuye a medida que aumenta el tiempo, lo que lleva a una interacción física de las moléculas inhibidoras en la superficie del metal. En un estudio del extracto de hoja de *Clematis Gouriana* se pudo evidenciar que la eficiencia del inhibidor aumentó a medida que el tiempo de inmersión también lo hizo (Mayakrishnan et al., 2011).

2.8 Investigaciones realizadas acerca de los extractos de plantas como inhibidores verdes

En las últimas décadas las publicaciones sobre inhibidores verdes de la corrosión han ido en aumento. Este creciente aumento se puede ver ilustrado en la figura 6.

Figura 5.

Interés mostrado por los inhibidores verdes en las últimas décadas respecto al número de publicaciones en ese periodo



Nota. Adaptado de (Marzorati et al., 2019)

En la industria del gas y petróleo existe un estándar de eficiencia de inhibición para los productos utilizados en cualquier operación, la eficiencia de un inhibidor en dicha industria debe ser o estar por encima del 90% (Marsh and Teh, 2007). Por lo anterior, en cada investigación se deben buscar las condiciones de temperatura, concentración y tiempo de exposición que permitan el mayor desempeño de un inhibidor verde en particular en un ambiente dado, para que de esta forma puedan llegar a ser competentes, considerando la posibilidad de reemplazar a los inhibidores

industriales utilizados actualmente, basándose siempre en que se debe estar por encima del estándar de esta industria.

Si bien los extractos de plantas han sido estudiados para inhibir el acero al carbono, los medios acuosos en los que se transportan los fluidos al interior de las tuberías de la industria de petróleo y gas como lo son el H₂S y el CO₂, no han sido estudiados lo suficiente como se presenta en la tabla 2.

Se puede evidenciar las pocas investigaciones en estos medios, en donde solo se observa en soluciones con cloruros y en presencia de CO₂, mientras que en el caso del H₂S, no se presentan pruebas experimentales aún teniendo en cuenta que es la principal fuente de corrosión en el interior de las tuberías. Por esta razón se hace necesario una ampliación en el tema por medio de investigaciones que incluyan ensayos experimentales que simulen las condiciones presentes en las tuberías de transporte, para determinar los posibles candidatos entre los extractos de plantas que pueden ser competentes a nivel industrial en el transporte de gas y petróleo. También cabe resaltar que, de las investigaciones realizadas, solo el extracto de Goma arábica no supera la eficiencia requerida (90%) para tales condiciones de operación, sin embargo, los demás extractos estudiados podrían llegar a ser posibles candidatos para inhibir la corrosión en esta área de la industria.

Tabla 2.

Tabla correspondiente a los extractos naturales usados en aceros para tuberías y medios que simulan tales condiciones.

| Extracto natural | Técnica utilizada | %IE | Medio | Condiciones | Referencia |
|----------------------------|---------------------------|-------|---|--|-------------------------------|
| <i>Tridax procumbens</i> | Extrapolación de Tafel | 99,95 | HCL 4 M con NaCl 3,5% saturado con CO ₂ | Concentración del inhibidor = 400 ppm T° = 40 °C | Aribo et al., 2017 |
| <i>Chromolaena odorata</i> | Extrapolación de Tafel | 99,88 | HCL 4 M con NaCl 3,5% saturado con CO ₂ | Concentración del inhibidor = 400 ppm T° = 40 °C | Aribo et al., 2017 |
| <i>Persea americana</i> | RP, EIE | 90 | NaCl 3,5% con CO ₂ | Concentración del inhibidor = 25 ppm tiempo = 6 h | A, 2003 |
| <i>Goma arábica</i> | EIS, PDP, Pérdida de peso | 70,27 | KCl 0,5 M saturado con CO ₂ | Concentración del inhibidor = 0,5 g/L | Palumbo et al., 2019 |
| <i>Coffea</i> | EIS | 99,9 | NaCl 3% con 10% diesel saturado con CO ₂ | Concentración del inhibidor = 10 ppm T° = 50 °C | Porcayo-Calderon et al., 2015 |

En las industrias de petróleo y gas también se aplica un método de estimulación ácida para mejorar la producción, para esto se utilizan diversos ácidos como el HCl, los cuales pueden causar corrosión en las tuberías de transporte en ausencia de inhibidores de corrosión (Kausalya & Hazlina, 2020).

Las investigaciones existentes en extractos naturales como inhibidores verdes de la corrosión en aceros al carbono se centran en ambientes con presencia de HCl. A su vez, la presencia de crudo y agua al interior de las tuberías es un factor importante como se mencionó anteriormente. En la tabla 3 se presentan algunas investigaciones a nivel de laboratorio que se han hecho sobre diferentes extractos naturales para aceros de tuberías y en presencia de los medios dichos anteriormente.

Tabla 3.

Investigaciones realizadas sobre extractos naturales para inhibir el acero al carbono en presencia de medios ácidos.

| Extracto natural | Técnica utilizada | %IE | Medio | Condiciones | Mecanismo | Referencia |
|-----------------------------|---------------------------|------|-----------------|---|------------|-----------------------|
| <i>Houttuynia cordata</i> | PDP | 95.5 | HCL 0,1 M | Concentración del inhibidor = 1500 ppm | Tipo mixto | Thanh et al., 2020 |
| <i>Dardagan fruit</i> | EIS, PDP, Pérdida de peso | 97 | HCl 1 M | Concentración del inhibidor = 3000 ppm tiempo = 6 h | Tipo mixto | Sedik et al., 2020 |
| <i>Pteridium aquilinum</i> | PDP, EIS | 96,9 | HCl 1 M | Concentración del inhibidor = 500 ppm T°= 25 °C | Tipo mixto | Wang et al., 2019 |
| <i>Turbinaria ornata</i> | PDP, EIS, Pérdida de peso | 100 | HCL 37% | Concentración del inhibidor = 25 g/L tiempo = 5 min | Tipo mixto | Krishnan et al., 2018 |
| <i>Musa paradisiaca</i> | PDP, Pérdida de peso | 97,7 | Petroleo - agua | Concentración del inhibidor = 4 g/L tiempo = 35 días | Tipo mixto | Agarry et al., 2019 |
| <i>Moringa oleifera</i> | PDP, Pérdida de peso | 96,5 | Petroleo - agua | Concentración del inhibidor = 4 g/L tiempo = 35 días | Tipo mixto | Agarry et al., 2019 |
| <i>Carica papaya</i> | PDP, Pérdida de peso | 99,2 | Petroleo - agua | Concentración del inhibidor = 4 g/L tiempo = 35 días | Tipo mixto | Agarry et al., 2019 |
| <i>Neolamarckia cadamba</i> | PDP, EIS | 91 | HCl 1 M | Concentración del inhibidor = 5 mg/L | Tipo mixto | Raja et al., 2013 |

2.9 Análisis crítico referente a las investigaciones acerca de extractos naturales

Los ensayos experimentales en estas investigaciones tienen ciertas falencias que han impedido la reproducibilidad y la suficiente competencia para llegar a escala industrial. Lo anterior se puede ver reflejado en la falta de caracterización del extracto usado en la mayoría de las investigaciones, la cual limita la adecuada identificación del principal responsable de inhibición o de las moléculas presentes en mayor proporción en este. Tan Kang y Kassim Jain, estudiaron el extracto de la corteza de *Rhizophora apiculata* para evaluar la inhibición en un acero dulce teniendo como medio el HCl a 1 M, en dicha investigación no se realizó una caracterización del

extracto, lo que impide tener certeza de la molécula responsable de la inhibición en el acero (Tan, 2011). De igual forma, en otras investigaciones como el extracto de la cascara de banano, la caña de azúcar, el melón y la sandía, los autores no realizaron su respectiva caracterización (Ismail, 2011; Odewunmi, 2015). A su vez, la falta de enfoque científico es otro factor que impide el buen desarrollo de inhibidores verdes, esto se ve principalmente en el enfoque que se tiene en las pruebas electroquímicas referentes al cálculo de eficiencia y no a los modelos de adsorción junto con los mecanismos asociados a estos (Marzorati et al., 2019). Por otro lado, existen investigaciones donde se hace el ajuste a un modelo de adsorción como el de Langmuir, pero este se encuentra lejos de la realidad ya que no tiene en cuenta muchos factores, lo que lo hace un modelo inapropiado para tales casos, o simplemente se obliga a adecuarse a dicho modelo u otros sin importar que no se adapte con los resultados, en lugar de buscar las posibles explicaciones científicas de lo que sucede en la superficie metálica (Raja, 2013; Chigondo, 2016). En las técnicas electroquímicas y de pérdida de peso, es importante considerar un análisis estadístico que permita la buena reproducibilidad evitando así posibles errores en la toma de mediciones en el caso de las pruebas electroquímicas o la presencia de defectos en la muestra de metal analizada para el caso de la técnica de pérdida de peso. Este análisis se debe hacer considerando una desviación estándar que permita hacer una comparación entre diferentes investigaciones sobre el mismo extracto obteniendo los mismos resultados o similares, lo que garantiza la buena reproducibilidad de este. Por ejemplo, Gómez en su estudio del extracto de la cáscara de manzana como inhibidor de la corrosión en un acero AISI SAE 1018 en un medio ácido, no realizó un análisis estadístico como el cálculo de la desviación estándar, lo cual impide hacer una comparación con investigaciones futuras y, por lo tanto, abrir paso a su reproducibilidad (En et al., 2016). Las pruebas existentes se limitan a ensayos de laboratorio que, si bien intentan simular las condiciones ambientales dentro

de las tuberías, no garantizan la completa reproducción de las condiciones y todos los factores que se han estudiado anteriormente. También se evidencia que la mayoría de estudios se centran en la parte que se utiliza generalmente para el consumo humano del producto natural en lugar de enfocarse en los desechos o residuos para un mejor aprovechamiento ecológico (Marzorati et al., 2019).

La utilización de plantas puede acarrear la disminución lenta del reino vegetal debido a que se le dará prioridad a la protección contra la corrosión de los materiales metálicos y no a la conservación de la naturaleza. Otro importante factor a considerar es la biodegradabilidad de los extractos naturales, ya que limita el almacenamiento de estos a largo plazo, sin embargo, se propone que mediante la adición de ciertos biocidas se puede prevenir su descomposición por microorganismos (M. Sangeetha, 2011).

La eficiencia de los extractos de plantas a determinadas condiciones es algunas veces igual o superior a la de los inhibidores industriales. Por esta razón, los productos vegetales emergerán como eficaces inhibidores de corrosión en un futuro cercano debido su fácil disponibilidad, biodegradabilidad, naturaleza no tóxica y su economía. Sin embargo, se deben evaluar los aspectos mencionados anteriormente y realizar una adecuada reproducibilidad y sostenibilidad a escala industrial.

3. Discusión

Basado en la literatura, se puede decir que las tuberías de transporte de petróleo y gas constantemente sufren deterioro en su superficie tanto interna como externa. En el interior de las tuberías, la corrosión está influenciada por factores como la presencia de gases tales como el dióxido de carbono y el sulfuro de hidrógeno que aumentan en gran medida la velocidad de deterioro de estas. La presencia de agua y oxígeno en los fluidos que se transportan también pueden provocar productos finales de corrosión mostrados como precipitados o herrumbre en la superficie metálica. La corrosión por H_2S y CO_2 es altamente agresiva para las tuberías de transporte y producen una pérdida acelerada del espesor, siendo generalmente la corrosión por dióxido de carbono menor que la producida por sulfuro de hidrógeno. En la industria de petróleo y gas es importante controlar y proteger las tuberías de transporte para evitar daños en los materiales y, por tanto, pérdidas económicas e impactos ambientales, por consiguiente, hay diferentes alternativas para el control de la corrosión en tales conductos. Las referencias bibliográficas consultadas indican que existen técnicas de protección de tuberías, entre las cuales se encuentran los revestimientos, la protección catódica y los inhibidores de corrosión, las cuales han sido efectivas para mitigar el deterioro de los materiales a causa del proceso corrosivo. Sin embargo, los inhibidores de corrosión son la técnica más usada para controlar la corrosión interna de las tuberías por ser un método flexible y económico, además de su alta eficiencia para combatir tal fenómeno.

En el transporte de gas y petróleo se ha optado por usar inhibidores de corrosión que son altamente efectivos para proteger el acero, pero resultan costosos y tóxicos para el medio ambiente.

Lo dicho anteriormente ha generado una mayor conciencia ecológica y esto a su vez ha llevado a crear en las industrias diferentes alternativas de protección de las tuberías, encontrando inhibidores amigables con el medio ambiente y económicos. Se han creado a partir de esto regulaciones ambientales, especialmente en la industria de petróleo y gas, donde se ha hecho necesaria la creación de un perfil verde y se han creado requisitos a la hora de seleccionar un inhibidor, donde se verifica que cumpla con criterios como toxicidad, biodegradación y bioacumulación. Los inhibidores verdes son una buena alternativa de implementación de las industrias porque cumplen con las diferentes normativas medioambientales. Además, son una línea de investigación importante en los últimos años, entre los cuales se encuentran los extractos naturales como las investigaciones más realizadas en las últimas dos décadas. Los extractos naturales son igual o más efectivos que los inhibidores tradicionales y además poseen características de ser ecológicos y de fácil disponibilidad. Una ventaja de usar los extractos naturales es que se puede aprovechar la mayoría de sus partes debido a sus propiedades anticorrosivas.

Los estudios realizados de extractos naturales han demostrado su alta eficiencia de inhibición, pero éstos dependen de diferentes factores, lo que puede conllevar a afectar su eficiencia. La eficiencia de inhibición como una de las variables más importantes, puede ser afectada por la concentración del inhibidor, la temperatura y el tiempo de exposición, entre otras variables. Es decir, la eficiencia crece a medida que aumenta la concentración y disminuye cuando la temperatura aumenta. La concentración del inhibidor también influye en la velocidad de corrosión, ya que ésta disminuye al aumentar los niveles de concentración, sin embargo, algunos estudios determinaron que se llega a un punto donde la concentración no influye de forma notable en la eficiencia. Por otro lado, el tiempo de exposición influye de forma negativa, ya que a medida que pasa el tiempo, la eficiencia tiende a disminuir. Con base en la literatura analizada, se puede

decir que los inhibidores verdes de corrosión representan un método efectivo para mitigar la corrosión en aceros al carbono expuestos a medios ácidos y alcalinos. Sin embargo, para que esta técnica progrese en la industria del petróleo y gas, especialmente en el área del transporte por tuberías, es necesario realizar futuras investigaciones que tengan en cuenta otros agentes corrosivos que se pueden encontrar dentro de las tuberías como el H₂S y el CO₂, entre otros, evaluando las variables como temperatura, concentración y tiempo de exposición del inhibidor con las cuales se obtengan las máximas eficiencias, disminuyendo así la velocidad de corrosión en la superficie de acero expuesta. A su vez, se hace necesaria la profundización de tales investigaciones abordando otras perspectivas donde se tengan en cuenta factores científicos como la caracterización del extracto natural para conocer el principal componente responsable de la inhibición en el acero. También, es importante centrarse en los modelos de adsorción, donde se debe buscar siempre las explicaciones científicas de cómo el inhibidor actúa sobre la superficie metálica y no usar los modelos preconcebidos para otros inhibidores clásicos y no verdes. Un análisis estadístico podría aportar un avance en este campo de investigación, puesto que permitiría evaluar la eficiencia del inhibidor verde dentro de un margen de error, evitando de esta manera posibles errores en su aplicación en campo y, por lo tanto, la pérdida de su eficiencia rápidamente, lo que conlleva a un aumento en su costo y competitividad con respecto a los convencionales. Otro aspecto por resaltar es que la mayoría de las investigaciones se centran en los productos verdes que son de consumo para el ser humano, sin embargo, unos pocos estudios se basan en los desechos naturales como inhibidores verdes, lo cual sería de gran avance en la ciencia e ingeniería, para que de esta forma se pueda obtener un verdadero aprovechamiento ecológico de los recursos naturales disponibles. Finalmente, se recomienda realizar en un futuro una investigación en esta área teniendo en cuenta los factores mencionados anteriormente con los cuales se podrá avanzar más

prontamente en la búsqueda de inhibidores de corrosión ecológicos, económicos, sostenibles, eficientes y competentes en la industria del petróleo y gas.

4. Conclusiones

Se llegó a establecer por medio de la revisión bibliográfica que la concentración de los extractos naturales actúa de manera directa con la eficiencia del inhibidor, donde a mayor concentración del inhibidor, su eficiencia tiene tendencia a aumentar, disminuyendo de esta forma la velocidad de corrosión del acero de tuberías, presentando así mismo, un punto en donde la concentración no tiene una notable influencia con la eficiencia.

Se determinó que factores como el tiempo y la temperatura influyen de manera negativa en la velocidad de corrosión al interior de las tuberías, de tal forma que, al aumentar estas variables, la eficiencia de inhibición disminuye y, por tanto, la velocidad del proceso corrosivo en la superficie metálica aumenta.

Se logró estudiar de manera crítica el manejo de los extractos naturales como inhibidores de corrosión, determinando algunas falencias en las investigaciones realizadas hoy en día como la falta de caracterización de los extractos, el mal enfoque en modelos de adsorción, la carencia de un análisis estadístico y el uso de extractos de consumo humano en lugar del aprovechamiento de desechos.

Se detectó la existencia de una línea de investigación enfocada en los extractos naturales como alternativa para la mitigación de la corrosión, destacándose la falta de estudios en condiciones similares a las expuestas en el interior de las tuberías de transporte que, podrían mejorarse para de esta forma lograr resultados de investigación más reales teniendo en cuenta las condiciones actuales de aplicación a escala industrial.

Referencias Bibliográficas

- A, C. (2003). Síntesis y caracterización de un inhibidor a base de aceite de aguacate para mitigar la corrosión de un acero X52 en medio dulce (Issue 1). <https://doi.org/10.16309/j.cnki.issn.1007-1776.2003.03.004>
- Adames-montero, Y., Colt-vela, G. C., Cueli-corugedo, A., Lopez-guerra, S., Delgado-guedez, B. A., Investigación, C. De, Blanca, V., La, C., Postal, C., Tecnológico, I., Rosa, U. S., El, S., & Teques, T. L. (2017). *Construcción De Oleoductos Mediante El Empleo De Diferentes Técnicas Analíticas*. 48(1), 1–9.
- Agarry, S. E., Oghenejoboh, K. M., Aworanti, O. A., & Arinkoola, A. O. (2019). Biocorrosion inhibition of mild steel in crude oil-water environment using extracts of *Musa paradisiaca* peels, *Moringa oleifera* leaves, and *Carica papaya* peels as biocidal-green inhibitors: kinetics and adsorption studies. *Chemical Engineering Communications*, 206(1), 98–124. <https://doi.org/10.1080/00986445.2018.1476855>
- Agraje, Z., Barahona, I., Quíroz, J., Pino, H., Hernández, C., & Saavedra, C. (2019). *Análisis comparativo de inhibidores verdes vs inhibidores tradicionales en la corrosión de los metales Comparative analysis of green inhibitors vs. inhibitors traditional in metal corrosion*. 5, 83–89.
- Al, M. S. et. (2011). *Green corrosion inhibitors-An Overview*. 52, 3–19.
- Ananda Louise Sathiyathan, R., Maruthamuthu, S., Selvanayagam, M., Mohanan, S., & Palaniswamy, N. (2005). Corrosion inhibition of mild steel by ethanolic extracts of *Ricinus communis* leaves. *Indian Journal of Chemical Technology*, 12(3), 356–360.
- Aribo, S., Olusegun, S. J., Ibhadiyi, L. J., Oyetunji, A., & Folorunso, D. O. (2017). Green inhibitors for corrosion protection in acidizing oilfield environment. *Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences*, 24, 34–38. <https://doi.org/10.1016/j.jaubas.2016.08.001>

- Becerra, Erika; Gualdrón, A. (2011). *ESTUDIO DE LA INHIBICIÓN DE CORROSIÓN POR HCL EN ACERO A CARBONO EN CRUDOS PESADOS MEDIANTE EL USO DE ACEITES ESENCIALES*. 22(3), 256–278.
- Biomorgi, José, Hernández, Samuel, Marín, Jairo, Rodríguez, Erik, Lara, Milton, & Vilorio, Alfredo. (2012). *Evaluación de los mecanismos de corrosión presentes en las líneas de producción de crudo y gas ubicadas en el noreste de Venezuela*. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 32(1), 96-106. Recuperado en 24 de agosto de 2020, de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0255-69522012000100012&lng=es&tlng=es.
- Bray, J. D., Rodríguez-Marek, A., & Gillie, J. L. (2009). Design ground motions near active faults. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 42(1), 1–8. <https://doi.org/10.5459/bnzsee.42.1.1-8>
- Bruce Mackay, N. A., Marko Stipanicev, Øystein B., Jackson, E. J., Jenkins, A., Melot, D., Schele, J., & Vittonato, J. (2016). La corrosión: La lucha más extensa. *Oilfield Review*, 28(2), 16. https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/spanish16/may16/03-corrosion.pdf
- Chigondo, M.; Chigondo, F. Recent Natural Corrosion Inhibitors for Mild Steel: An Overview. *J. Chem.* 2016, 2016
- Demoya, A. C. (2006). *De Combustibles Por Poliducto Modelling of the Pollutant Fronts Generated By Pipeline Fuel Transportation*. 89–96.
- Didiere, I., Islas, T., Cisneros, G. V., Qu, C., & Chamilpa, C. (2018). *Inhibidores verdes de la corrosión de materiales metálicos por biocombustibles. Green inhibitors of corrosion of metallic materials by biofuels*. 1. 9(21), 550–562.
- Eden, D. A., Srinivasan, S., & International, I. (2004). Green Inhibitors--Development and Applications for Aqueous Systems. *Corrosion*, 04059, 1–13.
- En, S., Corrosión, L. A., Acero, D. E. L., Virginia, I., Gómez, L., En, M., & Tecnología, C. Y. (2016). *Tesis Virginia Lidia Gómez Chacón*.

Físicas, F. D. E. C. (2008). *Modelado, planificación y control de sistemas de distribución de gas y derivados del petróleo.*

For, T. E., Sixth, T. H. E., Of, G., & Education, P. (2019). *ENERGY FOR AN INFORMED SOCIETY. Autor : Adrián Blanco Gutiérrez Director : Ignacio Hernández Campo.*

Fuentes, C., & Peña, D. (2007). Predicción de la corrosión por CO₂ + H₂S en tuberías de acero al carbono. *Scientia et Technica*, 36, 881–886.

García Inzunza, R. (2014). *Inhidores de corrosión de acero en medios ácidos a partir de extractos naturales.* 228.

Ismail, A., Irshad, H.M., Zeino, A. et al. Electrochemical Corrosion Performance of Aromatic Functionalized Imidazole Inhibitor Under Hydrodynamic Conditions on API X65 Carbon Steel in 1 M HCl Solution. *Arab J Sci Eng* 44, 5877–5888 (2019).

Kausalya, T., & Hazlina, H. (2020). *applied sciences Review on Corrosion Inhibitors for Oil and Gas Corrosion Issues.*

Kesavan, D., Gopiraman, M., & Sulochana, N. (2012). Green Inhibitors for Corrosion of Metals : A Review Correspondence : *Chemical Science Review and Letters*, 1(1), 1–8.

Krishnan, M., Subramanian, H., Dahms, H. U., Sivanandham, V., Seeni, P., Gopalan, S., Mahalingam, A., & Rathinam, A. J. (2018). Biogenic corrosion inhibitor on mild steel protection in concentrated HCl medium. *Scientific Reports*, 8(1), 1–16. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20718-1>

Marsh, J., Teh, T., 2007. Conflicting views – CO₂ corrosion models and corrosion inhibitor availability philosophies – the influence on subsea systems and pipelines design, presented at SPE International Conference Scotland, UK, September 2007, Paper No 109209MS.

Marzorati, S., Verotta, L., & Trasatti, S. P. (2019). Green corrosion inhibitors from natural sources and biomass wastes. *Molecules*, 24(1). <https://doi.org/10.3390/molecules24010048>

- Mayakrishnan, G., Pitchai, S., Raman, K., Vincent, A. R., & Nagarajan, S. (2011). Inhibitive action of *Clematis gouriana* extract on the corrosion of mild steel in acidic medium. *Ionics*, *17*(9), 843–852. <https://doi.org/10.1007/s11581-011-0584-9>
- M.A. Bodude, S.O. Oyegbami, & O.R. Oloyede. (2015). Investigation on the Inhibitive Properties of Some Selected Agro Food Extracts on Oil and Gas Pipeline. *Journal of Materials Science and Engineering A*, *5*(4), 119–123. <https://doi.org/10.17265/2161-6213/2015.3-4.003>
- Ministerio de Ambiente. (2014). Estudio De Potenciales Impactos Ambientales Y Vulnerabilidad Relacionada Con Las Sustancias Químicas Y Tratamiento De Desechos Peligrosos En El Sector Productivo Del Ecuador. Ministerio de Ambiente, Capitulo 4, 1–46. <http://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/03/PART5.pdf>
- Monroy Cruz, Y. Y. (2014). Bacterias sulfato reductoras. Universidad Militar de Nueva Grana, Bogotá, 28. <http://unimilitar-dspace.metabiblioteca.org/bitstream/10654/12039/1/BSR - SEMINARIO DE INVESTIGACION.pdf>
- Odewunmi, N.A.; Umoren, S.A.; Gasem, Z.M. Watermelon waste products as green corrosion inhibitors for mild steel in HCl solution. *J. Environ. Chem. Eng.* 2015, *3*, 286–296.
- Palumbo, G., Górný, M., & Banaś, J. (2019). Corrosion Inhibition of Pipeline Carbon Steel (N80) in CO₂-Saturated Chloride (0.5 M of KCl) Solution Using Gum Arabic as a Possible Environmentally Friendly Corrosion Inhibitor for Shale Gas Industry. *Journal of Materials Engineering and Performance*, *28*(10), 6458–6470. <https://doi.org/10.1007/s11665-019-04379-3>
- Porcayo-Calderon, J., Martínez De La Escalera, L. M., Canto, J., & Casales-Diaz, M. (2015). Imidazoline derivatives based on coffee oil as CO₂ corrosion inhibitor. *International Journal of Electrochemical Science*, *10*(4), 3160–3176.
- Raja, P.B.; Qureshi, A.K.; Abdul Rahim, A.; Osman, H.; Awang, K. Neolamarckia cadamba alkaloids as eco-friendly corrosion inhibitors for mild steel in 1 M HCl media. *Corros. Sci.* 2013, *69*, 292–301.
- Raja PB, Sethuraman MG (2008) Natural products as corrosion inhibitor for metals in corrosive media-A review. *Mater Letts* 62:113-116

- Sangeetha, M.; Rajendran, S.; Sathiyabama, J.; Krishnaveni, A. Inhibition of Corrosion of Aluminium and its Alloys by Extracts of Green Inhibitors. *Port. Electrochim. Acta* 2013, 31, 41–52.
- Sanni, O., Popoola, A. P. I., & Fayomi, O. S. I. (2019). Temperature Effect, Activation Energies and Adsorption Studies of Waste Material as Stainless Steel Corrosion Inhibitor in Sulphuric Acid 0.5 M. *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*, 5(4), 0–8. <https://doi.org/10.1007/s40735-019-0280-2>
- Sedik, A., Lerari, D., Salci, A., Athmani, S., Bachari, K., Gecibesler, H., & Solmaz, R. (2020). Dardagan Fruit extract as eco-friendly corrosion inhibitor for mild steel in 1 M HCl: Electrochemical and surface morphological studies. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 107, 189–200. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2019.12.006>
- Talara, O. (2012). Manual De Mantenimiento Y Reparación De Los Oleoductos De Operaciones Talara. *Unidad Ingeniería de Mantenimiento, PetroPerú*.
- Tan, K.W.; Kassim, M.J. A correlation study on the phenolic profiles and corrosion inhibition properties of mangrove tannins (*Rhizophora apiculata*) as affected by extraction solvents. *Corros. Sci.* 2011, 53, 569–574.
- Tejeda Benítez, L. P., Meza Castellar, P. J., Altamiranda Percy, E. D., & Berrocal Bravo, M. J. (2014). Plant extracts used as corrosion inhibitors. *Informador Técnico*, 78(2), 155. <https://doi.org/10.23850/22565035.99>
- Thanh, L. T., Vu, N. S. H., Binh, P. M. Q., Dao, V. A., Thu, V. T. H., Van Hien, P., Panaitescu, C., & Nam, N. D. (2020). Combined experimental and computational studies on corrosion inhibition of *Houttuynia cordata* leaf extract for steel in HCl medium. *Journal of Molecular Liquids*, 315, 113787. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.113787>
- Tiu, B. D. B., & Advincula, R. C. (2015). Polymeric corrosion inhibitors for the oil and gas industry: Design principles and mechanism. *Reactive and Functional Polymers*, 95, 25–45. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2015.08.006>
- Umoren, S.; Eduok, U. Application of carbohydrate polymers as corrosion inhibitors for metal substrates in different media: A review. *Carbohydr. Polym.* 2016, 140, 314–341

- Umoren, S.; Obot, I.; Madhankumar, A.; Gasem, Z. Performance evaluation of pectin as ecofriendly corrosion inhibitor for X60 pipeline steel in acid medium. *Carbohydr. Polym.* 2015, 124, 280–291.
- Upme, U. P. M. E. (2005). La cadena del Petróleo en Colombia. In *La cadena del petroleo*. http://www1.upme.gov.co/sites/default/files/news/3086/files/cadena_del_petroleo_2013.pdf
- W. Y. Mok, A. E. Jenkins, S. R. K. and C. G. G. (2005). CONTROL OF LOCALIZED CORROSION USING GREEN CORROSION INHIBITORS. 05289, 1–16.
- Wang, Q., Wang, Q., Ni, Z., Bao, H., & Li, X. (2019). Evaluation of corrosion inhibition to *Pteridium aquilinum* extract via the methods of electrochemistry experiment. *Materials Research Express*, 6(12). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab5479>
- Xhanari, K., Finšgar, M., Knez Hrnčič, M., Maver, U., Knez, Ž., & Seiti, B. (2017). Green corrosion inhibitors for aluminium and its alloys: A review. *RSC Advances*, 7(44), 27299–27330. <https://doi.org/10.1039/c7ra03944a>