

Evaluation of garlic extract as a corrosion inhibitor of carbon steel in acidic media

María Emilia Acosta Julio, Juliana Guerrero Franco, Pedro Meza-Castellar, Luis Bossa
Departamento de Ingeniería Química, Universidad de San Buenaventura, Cartagena, Colombia



How to cite this article: M. Acosta, J. Guerrero, P. Meza, L. Bossa, "Evaluación del extracto de ajo como inhibidor de corrosión del acero al carbono en medio ácido", *Ing-Nova*, vol. 3, no. 2, pp. 109-122, Jul. 2024. <https://doi.org/10.32997/rin-2024-4944>

Received: 7 de junio de 2024

Reviewed: 18 de junio de 2024

Accepted: 18 de junio de 2024

Corresponding author:

Luis Bossa

luis.bossa@usbctg.edu.co

Editor: Miguel Ángel Mueses. Universidad de Cartagena-Colombia.

Copyright: © 2024: M. Acosta, J. Guerrero, P. Meza, L. Bossa. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/> la cual permite el uso sin restricciones, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre y cuando que el original, el autor y la fuente sean acreditados.



ABSTRACT

This project evaluated the inhibition efficiency of the aqueous extract of *Allium sativum* (garlic), in order to reduce the corrosion of carbon steel in an acid medium. The first step of this research was to obtain and characterize the extracts obtained in ethanol and water, through phytochemical tests, identifying the presence of total phenols in a maximum concentration of 86,05 mg/100 mL for the decomposing garlic extracts obtained with ethanol. Subsequently, to verify the inhibition efficiency, weight loss tests were carried out to determine the corrosion rate using different concentrations in the extracts. The results obtained showed that the garlic extract at higher concentration reached better efficiencies, being the decomposing garlic extracts obtained in ethanol the ones that presented the highest efficiency (82,70 % for a concentration of 10% of the extract).

Finally, the calculation of the adsorption isotherm allowed determining that the inhibition mechanism was by physisorption, with a value of -15,002 kJ/mol, which indicated that the extract was adsorbed on the surface of carbon steel. The results obtained from this research allow determining that the garlic extract decomposed in ethanol has potential as a corrosion inhibitor, since it presents inhibition efficiency of 77% to 82%, effectively reducing the corrosion rate of carbon steel sheets in an acid medium and at the same time being environmentally friendly.

Keywords: *Allium sativum*; Corrosion; Inhibitor; Weight loss; Agricultural Residuals.

Evaluación del extracto de ajo como inhibidor de corrosión del acero al carbono en medio ácido

RESUMEN

Se evaluó la eficiencia de inhibición del extracto acuoso de *Allium sativum* (ajo), con la finalidad de disminuir la corrosión del acero al carbono en medio ácido. El primer paso de esta investigación fue la obtención y caracterización de los extractos obtenidos en etanol y agua, a través de pruebas fitoquímicas, logrando identificar la presencia de fenoles totales, en una concentración máxima de 86,05 mg/100 mL para los extractos de ajo podrido obtenidos con etanol. Posteriormente, para verificar la eficiencia de inhibición, se realizaron pruebas de pérdida de peso para determinar la velocidad de corrosión utilizando diferentes concentraciones en los extractos. Los resultados obtenidos demostraron que el extracto de ajo a mayor concentración alcanzó mejores eficiencias, siendo los extractos de ajo podrido obtenidos en etanol los que presentaron mayor eficiencia (82,70 % para una concentración del 10% del extracto).

Finalmente, el cálculo de la isoterma de adsorción permitió determinar que el mecanismo de inhibición fue por fisiorción, con valor de $-15,002$ kJ/mol, lo cual indicó que el extracto fue adsorbido sobre la superficie del acero al carbono. Los resultados obtenidos de esta investigación permiten determinar que el extracto de ajo descompuesto en etanol tiene potencial como inhibidor de corrosión, ya que presenta eficiencia de inhibición de un 77 % hasta un 82%, logrando reducir la velocidad de corrosión de las láminas de acero al carbono en medio ácido de manera efectiva y al mismo tiempo siendo amigable con el ambiente.

Palabras clave: Allium sativum; Corrosión; Inhibidor; Pérdida de peso; Residuos Agrícolas.

1. Introducción

El fenómeno de la corrosión consiste en el proceso de deterioro de un material metálico mediante reacciones químicas y electroquímicas, debido a que estos materiales buscan alcanzar un estado de menor potencial energético [1]. Según el último reporte de la National Association of Corrosion Incineres – NACE Internacional (Medidas internacionales de Prevención, Aplicación y Económicas del Estudio Tecnológico de la Corrosión) en febrero del 2023, el coste directo de la corrosión en todo el mundo oscilaba alrededor de los 2,5 trillones de dólares, un valor que ni siquiera incluye consecuencias ambientales causadas por este fenómeno, lo que equivaldría aproximadamente un 3,4 % del Producto Interno Bruto (PIB) mundial. Lo anterior llevó a la implementación de estrategias que permitieran disminuir esos costos a futuro, previendo entre un 15 % - 35% [2].

A nivel nacional, los datos más actuales estiman que las pérdidas en las industrias se aproximan alrededor del 3 - 4% del PIB. Las Industrias del petróleo y gas sufren pérdidas económicas de \$1.372 millones cada año debido a problemas relacionados con la corrosión. En Colombia, por ser un país con diversidad climática, la corrosión se presenta en los materiales metálicos de diferentes formas teniendo en cuenta, principalmente, el medio al que esté expuesto [3].

Son múltiples los parámetros y factores ambientales que influyen en el deterioro de los materiales metálicos, como la temperatura, el pH, la salinidad, etc., en donde los procesos de prevención de la corrosión incluyen medidas como la protección catódica, los tratamientos superficiales o el control de ambientes agresivos mediante inhibidores [4], siendo esta última, la técnica de control más utilizada, debido que son compuestos químicos que se adsorben al metal, formando una capa protectora sobre la superficie expuesta, disminuyendo la velocidad de corrosión sustancialmente, bien sea por precipitación de compuestos sobre la superficie de metal o por la formación de capas absorbidas o pasivantes [5].

Debido a la elevada toxicidad que presentan algunos inhibidores de corrosión, especialmente el fosfato y el cromato, que provocan no solo daños en la salud sino también en el medio ambiente, su uso ha sido restringido, dando lugar a inhibidores orgánicos, ambientalmente amigables, los cuales son elaborados a partir de aceites esenciales, extractos de plantas y compuestos purificados de origen natural. Lo anterior, permite que estas sustancias no solo sean amigables con el medio ambiente, sino que, además, disminuyan los costos de adquisición debido a que provienen de recursos renovables y residuos agrícolas [6].

Algunas investigaciones han encontrado que el ajo, no solo es beneficioso para la salud, también sus propiedades le permiten posicionarse como un inhibidor de corrosión amigable con el medio ambiente, compatible con distintos metales [7,8], lo que origina una contribución para la ciencia y la industria, sobre

todo, en la lucha actual contra el cambio climático y los costos de producción y mantenimiento industrial. El ajo es considerando un recurso renovable, asequible, amigable con el medio ambiente y mucho menos nocivo para la salud, a diferencia de los inhibidores de corrosión químicos, en los que se implementan el uso de solventes de extracción que suelen ser tóxicos y costosos.

La presente investigación tuvo como propósito evaluar el potencial anticorrosivo de los extractos de ajo en la inhibición de la corrosión del acero al carbono como estrategia de aprovechamiento y valorización de residuos agrícolas.

1. Materiales y métodos

La presente investigación es cuantitativa de tipo experimental. Se considera una investigación cuantitativa aquella en la que se recogen y se analizan datos cuantitativos sobre algunas variables [9]. Para la recolección y procesamiento de los datos se utilizaron hojas de cálculo de Excel, donde por medio de tablas, gráficas u otras herramientas se logró analizar y determinar de manera cuantitativa el efecto de las variables independientes sobre las variables dependientes. También se empleó el software StatGraphics para la realización de análisis de varianza.

Para la caracterización de los extractos se llevó a cabo la aplicación de los métodos de la Association of Official Analytical Chemists (AOAC 2017.13) con el fin de determinar el contenido de fenoles totales que se encontraban en los extractos de *Allium sativum* (Ajo).

Los ajos frescos y en descomposición requeridos para la obtención del extracto inhibidor fueron obtenidos de un mercado local de la ciudad de Cartagena; Se seleccionaron 150 g de ajo fresco y 150 g de ajo podrido, utilizando como solventes 250 mL de agua destilada y 250 mL de etanol al 95% v/v, para un total de 4 montajes de extracción. La extracción se llevó a cabo mediante un extractor Soxhlet durante un reflujo de 3 horas empleando los dos solventes por separado (ver Figura 1). Esto se elaboró especialmente para evaluar la incidencia del solvente sobre los resultados finales.



Figura 1. Proceso de obtención de los extractos

Asimismo, para verificar la eficiencia de inhibición se utilizaron láminas de acero al carbono de dimensiones 3 x 4 cm con espesor 0,2 mm, las cuales fueron sumergidas en diferentes recipientes que contenían cada uno

200 mL de HCl 0,5 M. Antes de ser sumergidas las láminas en HCl se les determinó su masa inicial, empleando una balanza (Ohaus Pioneer PA313) y posteriormente se les calculó la masa perdida cada 24 horas durante dos semanas como se puede observar en la (Figura 2).



Figura 2. Montaje experimental de la prueba de pérdida de peso.

Se implementó un diseño experimental factorial 2^k con un total de 3 variables independientes cada una con dos niveles TABLA I: solvente de extracción (etanol y agua), concentración del extracto (5% y 10%) y tipo de ajo (fresco y descomposición), para un total de 24 muestras, las cuales fueron analizadas mediante pruebas de pérdida de peso para la determinación de la velocidad de corrosión. Cabe resaltar que las pruebas fueron realizadas por triplicado.

Tabla 1. Variables experimentales

Variables independientes	Representación	Niveles	Simbología
Tipo de ajo	A	Fresco	-
		Descomposición	+
Solvente de extracción	B	Agua	-
		Etanol	+
Concentración del extracto	C	5 % v/v	-
		10 % v/v	+

En la Tabla 2 se describen las condiciones del diseño experimental empleado, donde (-) y (+) representan los niveles inferior y superior, de las variables independientes. La variable dependiente corresponde a la "Eficiencia de inhibición (%)".

Tabla 2. Diseño experimental

Tratamiento	Variables independientes		
	A	B	C

1	+	+	+
2	+	+	-
3	+	-	+
4	+	-	-
5	-	+	+
6	-	+	-
7	-	-	+
8	-	-	-

La eficiencia de inhibición se determinó a partir de las pérdidas de peso calculadas a cada uno de los tratamientos del diseño experimental (Δm_{ci}), transcurridas las 24 horas, y se relaciona con la masa perdida por las láminas que se utilizaron como blanco (Δm_{si}), empleando la siguiente ecuación:

$$EI = \left(\frac{\Delta m_{si} - \Delta m_{ci}}{\Delta m_{si}} \right) \times 100 \quad (1)$$

Donde, EI es la eficiencia de inhibición, Δm_{si} es la pérdida de masa de las láminas sin presencia de inhibidor y Δm_{ci} es la pérdida de masa de las láminas con presencia de inhibidor.

La pérdida de peso se monitoreo durante 15 días con el fin de determinar el tiempo en el cual se estabiliza dicha pérdida. Con el análisis de varianza y la prueba de pérdida de peso se determinó que extracto presentaba la mayor eficiencia para realizar la isoterma de adsorción.

Para la determinación de la isoterma de adsorción se realizaron pruebas de pérdida de peso por triplicado utilizando láminas de acero al carbono sumergidas en HCl 0,5 M, con concentraciones del inhibidor (C) del 0%, 1%, 3%, 5%, 8%, 10%, 12% y 15%. Se calculó la masa inicial de las láminas y la masa final transcurridas las 24 horas. Con estos datos se construyeron gráficas de eficiencia Vs concentración y, a partir de la aplicación del modelo de Langmuir, se determinó el valor de la energía libre de Gibbs (ΔG) para definir si el mecanismo es fisorción, si ΔG es menor o cercano a - 20 kJ/ mol, o quimisorción, si ΔG mayor a - 40 KJ / mol [10].

Los resultados de estas pruebas permitieron calcular las pérdidas de peso, las eficiencias de inhibición (EI) y el grado de cobertura de la superficie inhibidora sobre la superficie del metal ($\theta = EI/100$) mediante la expresión:

$$\frac{C}{\theta} = C + \frac{1}{K} \quad (2)$$

La constante K se determina como el inverso del intercepto con el eje "y" (C/) a partir de la regresión lineal realizada a los datos graficados [11]. El cálculo de esta constante permitió hallar la energía libre de Gibbs (ΔG) asociada al proceso de adsorción:

$$\Delta G_{Ads} = -RTLn(KC_{agua}) \quad (3)$$

Donde R es la constante universal de los gases ($8,314 \times 10^{-3}$ kJ/mol·K), T la temperatura de la prueba de pérdida de peso (303,15 K), K la constante de equilibrio para el proceso de adsorción (mL/g), y C_{agua} la

concentración del agua pura (1 g/mL equivalente a 55,55 mol/L). Con el valor de ΔG_{Ads} se estableció si el tipo de interacción entre el metal y el inhibidor fue por adsorción física (fisorción) o adsorción química (quimisorción) [12].

2. Resultados

Caracterización fitoquímica de los extractos

En la Tabla 3, se presentan los resultados de la determinación del contenido de fenoles totales de los extractos de *Allium sativum* mediante el método AOAC 2017.13 Official Methods of Analysis, 21st Edition (2019) [12].

Tabla 3. Contenido fenoles totales de los extractos de *Allium Sativum*

Tipos de extractos	Concentración (mg /100mL)
Ajo descomposición agua	28,13
Ajo descomposición Etanol	86,05
Ajo fresco Etanol	26,39
Ajo fresco Agua	22,34

Prueba de pérdida de peso y eficiencia de inhibición

Se llevó a cabo un estudio sobre la inhibición de la corrosión del acero al carbono en HCl 0,5 M con el objetivo de evaluar la eficiencia de los extractos de ajo. Esto se logró al calcular la velocidad de corrosión mientras se variaba la concentración del extracto inhibidor (5% y 10%), el solvente de extracción (agua y etanol) y el tipo de ajo (fresco y descomposición). Para garantizar la precisión de los resultados y obtener una estimación más exacta del impacto de cada factor en el estudio, se realizaron dos réplicas del experimento. El desarrollo de las pruebas de pérdida de peso arrojó los resultados de las figuras 3 a 6, donde se presentan las curvas de pérdida de peso del acero al carbono (g) Vs el tiempo de inmersión de las placas (h).

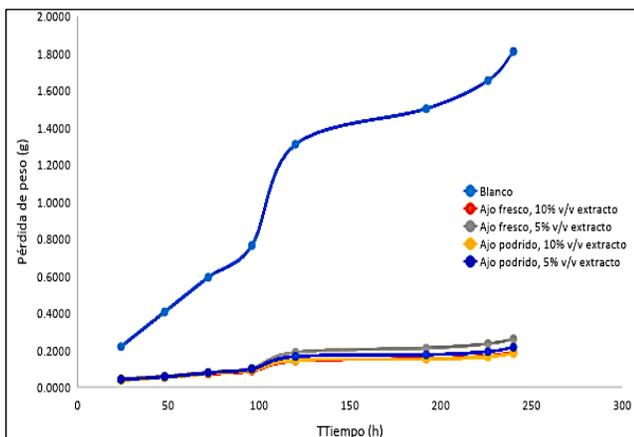


Figura 3. Pérdida de peso del acero al carbono empleando como solvente etanol.

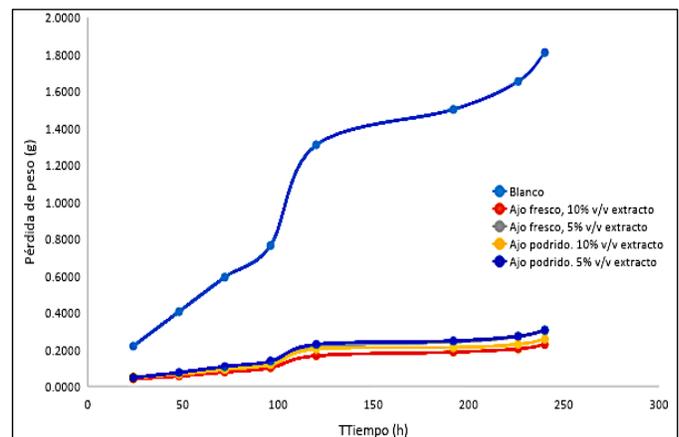


Figura 4. Pérdida de peso del acero al carbono empleando como solvente agua.

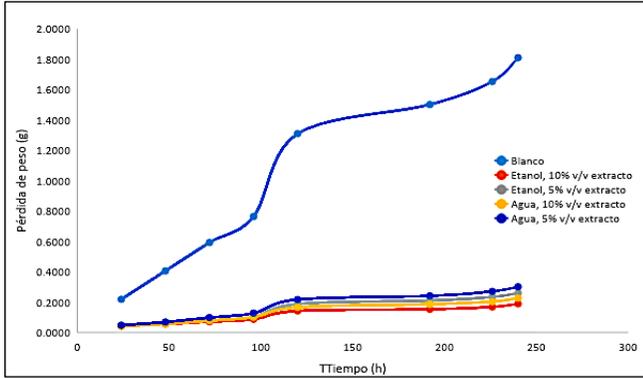


Figura 5. Pérdida de peso del acero al carbono empleando extracto de *Allium sativum* (ajo) en fresco.

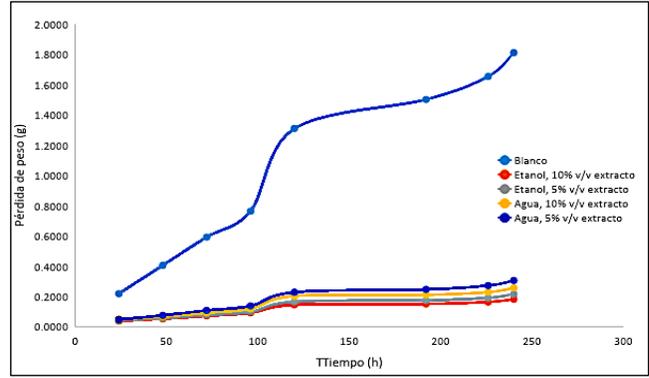


Figura 6. Pérdida de peso del acero al carbono empleando extracto de *Allium sativum* (ajo) en descomposición.

En la Tabla 4 aparecen reportadas las eficiencias de inhibición calculadas a las 24 horas de inmersión:

Tabla 4. Resultados del diseño experimental

Tratamiento	Variables independientes			Variable dependiente
	A	B	C	Eficiencia de inhibición (%)
1	+	+	+	82,70 ± 1,67
2	+	+	-	81,22 ± 0,50
3	+	-	+	77,18 ± 1,30
4	+	-	-	78,00 ± 3,05
5	-	+	+	80,57 ± 0,83
6	-	+	-	80,25 ± 1,10
7	-	-	+	81,25 ± 0,50
8	-	-	-	77,85 ± 0,08

En la Tabla 5 y la (véase Fig. 7) se puede observar el resultado del análisis de varianza obtenido para la eficiencia de inhibición:

Tabla 5. Análisis de Varianza

Fuente	Valor-P
A: Tipo de ajo	0,8009
B: Solvente extracción	0,0037
C: Concentración extracto	0,1807

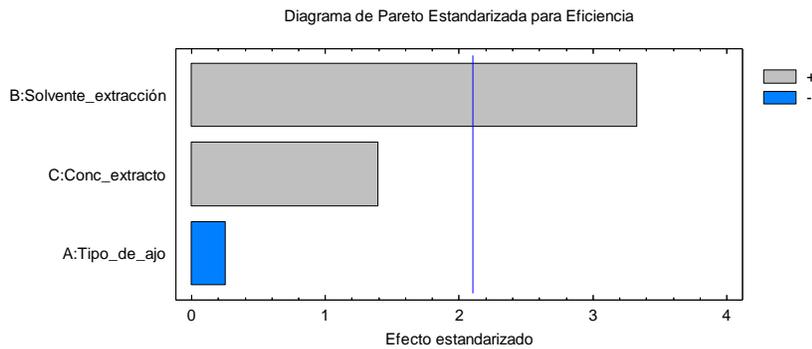


Figura 7. Diagrama de Pareto estandarizado para el diseño experimental

Isoterma de adsorción

En la Tabla 6 aparecen reportados los resultados de las pérdidas de peso promedio obtenidas para el cálculo de las isotermas:

Tabla 6. Pérdida de peso para resultados de isoterma

C (g/mL)	0	0,01	0,03	0,05	0,08	0,1	0,12	0,15
	0	1	3	5	8	10	12	15
Δm1 (g)	0,208	0,044	0,029	0,029	0,024	0,026	0,020	0,020

En la Tabla 7 se puede observar los datos utilizados para el cálculo de la isoterma adsorción.

Tabla 7. Datos utilizados para el cálculo de la isoterma adsorción.

EI (%)	78,9	85,9	85,9	88,5	87,7	90,2	90,6
Θ (superficie cubierta)	0,789	0,859	0,859	0,885	0,877	0,902	0,906
C/Θ (g/mL)	0,013	0,035	0,058	0,090	0,114	0,133	0,166

En la Figura 8 se aprecia la isoterma de adsorción:

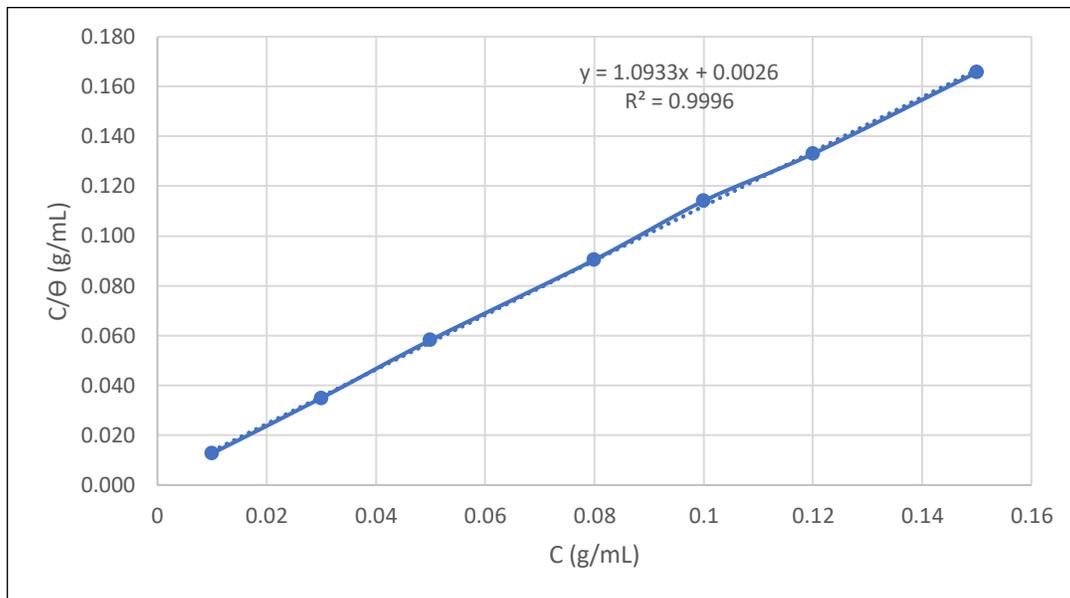


Figura 8. Grafica isoterma de adsorción de Langmuir.

En la Tabla 8 se puede observar los resultados obtenidos de la gráfica de la isoterma de adsorción.

Tabla 8. Parámetros obtenidos de la gráfica de la isoterma de adsorción

Pendiente de la recta	1,0933
1/K	0,0026
K	384,61
ΔG (J/mol)	-15001,72
ΔG (kJ/mol)	-15,002

3. Analisis de resultados

Los fenoles son compuestos orgánicos con presencia de anillos aromáticos y grupos OH en su estructura. Diferentes autores han asociado la capacidad de inhibición de la corrosión de los fenoles a su capacidad de formar enlaces con los cationes $Fe^{3+} + Fe^{2+}$ los cuales se adhieren a la superficie del metal, formando una película protectora en la parte superior del acero, evitando la corrosión del mismo [1,13]. Meriem y colaboradores, atribuyeron la inhibición de la corrosión del acero al carbono en medio ácido a la presencia de fenoles en los extractos de las hojas de Artemisia herba alba. La formación de la capa inhibidora la asociaron con las interacciones de los orbitales vacíos de los anillos fenólicos los cuales pueden aceptar un electrón de los orbitales 4s o 3d del hierro [14]. Z.Ait EL Caid y colaboradores, utilizaron extractos de cáscara de maní en medio ácido para inhibir la corrosión del acero al carbono, asociando la inhibición a la presencia de compuestos fenólicos [15].

En la Tabla 3 se puede observar la cantidad de fenoles totales que se encuentran en el ajo, el cual dio mejor resultado en el ajo podrido utilizando como solvente etanol, con una concentración del 86,05 (mg/100mL). Esto se debe a que durante la descomposición del ajo o al ser triturado se producen reacciones enzimáticas las cuales aumentan las concentraciones de fenoles presentes en él, produciendo rupturas en sus células y liberación de sus compuestos fenólicos como la alicina, ajoenos y otros compuestos sulfurados. Estos compuestos son más solubles en solventes orgánicos como el etanol, debido a que pueden formar puentes de hidrógeno entre sí, ya que ambos tienen grupos hidroxilo (-OH) [16].

En las curvas de las figuras 3 y 4, se observa que la pérdida de peso de las placas de acero al carbono aumenta con el tiempo de inmersión a lo largo de las 240 h, siendo mucho mayor en el blanco con un valor de 1,8103 g en comparación con los recipientes que contienen los extractos de ajo, siendo la menor pérdida 0,1817 g, la cual fue obtenida en el extracto de ajo podrido al 10% v/v utilizando como solvente etanol. Lo anterior, muestra como los extractos contribuyen a la disminución de la velocidad de la corrosión del acero al carbono en medio ácido, lo cual puede atribuirse a la interacción de los compuestos fenólicos con la superficie del metal, al formar una capa protectora sobre él [17].

A su vez, las pérdidas de peso fueron menores en los extractos obtenidos en etanol en comparación con los obtenidos en agua, siendo el mejor resultado para etanol 0,1817 g (ajo podrido al 10% v/v) y para el agua 0,2267g (ajo fresco al 10% v/v). Esto puede asociarse a que el etanol, por ser un solvente orgánico, puede extraer mayor cantidad de compuestos fitoquímicos en comparación con el agua. De igual manera, las gráficas muestran que entre mayor sea la concentración del inhibidor, menor es la pérdida de peso, lo cual está relacionado con la mayor presencia de compuestos fitoquímicos entre más alta sea la concentración del extracto. Ahchouch y colaboradores, utilizaron hojas de Hedera helix en HCl 1 M sobre acero al carbono, encontrando que entre mayor sea la concentración del extracto menor fue la velocidad de corrosión, debido al incremento en la concentración de compuestos fenólicos de origen natural como kaempferol y Trans-chalcone [18].

De acuerdo con las (Fig. 5 y Fig 6) transcurrida las 240 h, los extractos obtenidos empleando ajo fresco presentaron pérdidas de peso mayores que los obtenidos con ajo podrido, encontrándose valores de 0,1890 g para ajo fresco al 10% v/v y 0,1817 g para ajo podrido al 10% v/v, utilizando como solvente etanol para los dos extractos. Estos resultados se asocian a que el ajo podrido en etanol reportó concentraciones de fenoles totales de 86,05 mg /100mL mientras que el ajo fresco de 26,39 mg /100mL. Elhady y colaboradores,

utilizaron granos de café, sobre el acero al carbono en HCl 0,5 M encontrando que al pasar el tiempo las pérdidas de peso disminuían a medida que aumentaba la concentración de los extractos los cuales contenían mayores concentraciones de compuestos fenólicos [19].

Las curvas de pérdida de peso en los experimentos sin extracto inhibidor (blanco) presentaron una pendiente más pronunciada en comparación con las curvas obtenidas con los extractos de ajo fresco y en descomposición. Esto sugiere que el inhibidor funcionó en ambas soluciones, siendo más evidente su efecto en etanol. La reducción de la pendiente en la pérdida de peso del metal indica que las moléculas de los extractos se adhirieron a la superficie del acero al carbono inhibiendo el proceso de corrosión.

Con respecto a las eficiencias de inhibición, el análisis de varianza del diseño experimental (TABLA IV y Fig 7) mostró que los factores tipo de ajo y concentración del extracto no presentan significancia estadística relevante sobre esta (valores P de 0,8009 y 0,1807 respectivamente), mientras que el factor solvente de extracción arrojó un valor P de 0,0037. El diagrama de Pareto (Fig. 7) muestra que el nivel (+) del factor solvente de extracción es el que tiene mayor incidencia estadística sobre la eficiencia de inhibición. Lo anterior, se corroboró con los resultados obtenidos en la TABLA V, en la cual se alcanzan las más altas eficiencias empleando etanol como solvente, siendo la mayor 82,70%. Eficiencia de inhibición cercanas a éstas (89,7% y 84%) fueron reportadas para los extractos de *Garcinia gummi-gutta* en HCl 1 M sobre acero al carbono [20]. Belakhdar y colaboradores, encontraron que el acero al carbono sumergido en HCl 1 M aumentaba su pérdida de peso a medida que transcurría el tiempo, pero la incorporación de los extractos *Rosmarinus officinalis* en el medio corrosivo lograron reducir esta pérdida mostrando una eficiencia del 80,4% [21]. A su vez, Mohammed y Othman, reportaron una eficiencia de 82% utilizando semillas de palma datilera (*Phoenix dactylifera*) sobre acero al carbono sumergido en HCl 0.5 M [22].

El proceso de adsorción de un inhibidor sobre la superficie de un metal depende de las interacciones que se lleven a cabo entre estos, las cuales están asociadas al tipo de metal y la estructura química del inhibidor [22]. Diferentes investigaciones realizadas con extractos naturales como inhibidores de corrosión han establecido que los valores de ΔG cercanos a -20 kJ/mol se asocian al mecanismo de fisorción mientras que valores cercanos a -40 kJ/mol o más negativos se asocian con quimisorción [23].

Al construir la isoterma de adsorción para los extractos de ajo podrido obtenidos en etanol, a partir de los datos de las TABLAS VI y VII, se obtuvo la Figura 8, en la cual la regresión lineal realizada muestra que los datos se ajustan al comportamiento de una isoterma de Langmuir ($R^2 = 0,9996$). Lo anterior, es coherente con lo reportado por diferentes autores que han desarrollado inhibidores de corrosión a partir de extractos naturales. Los extractos de hojas de espinaca fueron evaluados sobre acero al carbono en HCl 1 M obteniendo isotermas de Langmuir [24]. De igual manera, para los extractos de semillas de aguacate se obtuvo una isoterma de Langmuir en acero al carbono sumergido en HCl 1 M [25].

Para el extracto de ajo podrido, obtenido en solvente etanol, se calculó un valor de $\Delta G = -15,002$ kJ/mol el cual corresponde a fisorción. Este resultado concuerda con diferentes autores que han estudiado extractos de plantas como inhibidores de corrosión. Acidi y colaboradores, evaluaron el aceite esencial de *Syzygium aromaticum* como inhibidor de la corrosión del acero al carbono en HCl 0,5 M con el cual obtuvieron un valor de $\Delta G = -13,97$ kJ/mol [26]. A su vez, Zakaria y colaboradores, obtuvieron un $\Delta G = -16,81$ kJ/mol con extracto etanólico de vainas de frijol como inhibidor de corrosión del acero al carbono en HCl 0,5 M [27]. De igual

manera, Thakur y colaboradores, reportaron un valor de $\Delta G = -12.74$ kJ/mol con extractos de *Sonchus arvensis* como inhibidor de corrosión del acero al carbono en HCl 0,5 M [28].

Conclusiones

La caracterización de los extractos de *Allium sativum* (ajo) permitió identificar mediante análisis fitoquímicos un alto porcentaje de fenoles totales con un valor de 86,05 (mg /100mL). Los cuales ayudan a inhibir la corrosión que se presenta en los metales formando una capa protectora en la superficie, logrando así disminuir la velocidad de corrosión, como así mismo, el contacto directo entre el metal y el medio corrosivo. A través del análisis de pérdida de peso se alcanzó una mayor eficiencia de la inhibición de la corrosión utilizando ajo podrido con solvente etanol con un valor de 82,70 %. Esto se debe a que durante la descomposición del ajo o al ser triturado se producen reacciones enzimáticas las cuales aumentan las concentraciones de fenoles presentes en él.

Con el análisis de varianza se ratificó los resultados obtenidos en las pruebas de pérdidas de peso, y en el diagrama de Pareto se evidenció que la eficiencia de inhibición al acero al carbono se debía principalmente al solvente de extracción.

El cálculo de la isoterma de adsorción de Langmuir dio como resultado una energía libre de Gibbs de -15,002 kJ/mol, la cual corresponde a fisisorción. Lo anterior, implicó una rápida interacción entre el extracto inhibidor del ajo y el acero al carbono, logrando así ralentizar el proceso corrosivo alcanzando eficiencias de inhibición entre 77 % hasta un 82%, sobre las láminas de acero al carbono en etanol.

La relación entre la concentración del extracto y la efectividad para prevenir la corrosión mostró un comportamiento directo durante las pruebas de adsorción. Este hallazgo concuerda con los artículos revisados, ya que a medida que aumenta la concentración también aumenta la superficie del metal protegida por el inhibidor, debido a una mayor adsorción de moléculas de extracto en la superficie metálica.

Durante la prueba de pérdida de peso y de isoterma de adsorción, las muestras de extracto sin inhibidor (blanco) alcanzaron velocidades de corrosión bastante elevadas a diferencia de las placas sumergidas en solución de extractos de ajo fresco y en descomposición. Esto indicó que el extracto de ajo actúa como inhibidor de corrosión protegiendo la superficie del metal contra el ataque del ion cloruro disminuyendo la velocidad de corrosión.

En la realización de este proyecto las principales limitaciones fueron económicas ya que no se contaba con el recurso necesario para realizar otro tipo de pruebas u análisis que permitieran conocer específicamente en qué proporción se encuentran los alcaloides, saponinas, flavonoides y taninos presentes en el ajo, puesto que de esa manera se podrían identificar qué complejos aparecen en la superficie del metal para proporcionar una capa protectora.

Referencias

- [1] R.W. Revie, H.H. (2008). "Corrosion and Corrosion Control - An Introduction to Corrosion Science and Engineering". Wiley & Sons, Inc: USA.

- [2] H. Ahchouch. (2023). "From nature to protection: Unleashing the protective potential of Hedera helix leaves against corrosion in harsh acidic environments using experimental and theoretical insights", Arab. J. Chem., vol. 17, n.º 2, p. 105593. doi: 10.1016/j.arabjc.2023.105593.
- [3] E. Verma, H. Gajera, D. Ramani, N. Bist, A. Sircar (2022). "Corrosion in the light of electrochemistry" Corrosion in the light of electrochemistry.
- [4] S. Belkaid, S. Hamdani and D. Mansour. (2022). "Garlic Extract as an Environmentally Corrosion Inhibitor of API X60 Carbon Steel and 316L Stainless Steel in Sulphuric Acid" Portugaliae Electrochimica Acta 40 259-272.
- [5] C. Chávez, (2023). "Evaluación del ácido tióctico como inhibidor de corrosión en acero al carbón en medio ácido", Trabajo de Grado para obtener título de Ingeniera Química Metalúrgica, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México, pág. 15-16.
- [6] K. Zakaria, M. A. Abbas, M. A. Bedaircd (2022). "Herbal expired drug bearing glycosides and polysaccharides moieties as green and cost-effective oilfield corrosion inhibitor: Electrochemical and computational studies" Journal of Molecular Liquids Vol. 352, 118689.
- [7] M.P. Asfia, M. Rezaei. (2021). "A study on localized corrosion behavior of 304 stainless steel in the presence of Allium Sativum extract inhibitor using electrochemical noise analysis" Materials Chemistry and Physics Vol 274, Art no.125158.
- [8] L.S. Barreto, TF. De Almeida, A. de M. Santos, MS. Tokumoto, F. Coting, and VR. Capelossi. (2021). "Evaluation of vegetables residues as corrosion inhibitors", Research, Society and Development, vol 10, num. 8, pág. e28710817409.
- [9] V. E. Chávez. (2021). "Triangulación metodología cualitativa y cuantitativa" Revista sobre estudios e investigaciones del saber académico. Pag. 76-81.
- [10] K.Ramakrishnan,S. Karthikeyan,D. Rajagopal. (2022). "2-Methoxy-4-(4-(6-nitrobenzothiazol-2-yl) amino methyl)-1-phenyl-1H-pyrazol-3-yl) phenol as powerful anti-corrosion inhibitor substantiated by Langmuir adsorption studies" Materials Letters. Vol 313. Art no. 131823
- [11] I. Langmuir. (1918). "The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum, J. Am. Chem". Soc. 40 (9). 1361-1403.
- [12] A. Kokalj, "Corrosion inhibitors: physisorbed or chemisorbed?", Corros. Sci., vol. 196, p. 109939, mar. 2022, doi: 10.1016/j.corsci.2021.109939.
- [13] Z. Song. (2024). "Inhibition performance of extract reinforcement corrosion inhibitor from waste Platanus acerifolia leaves in simulated concrete pore solution", Case Stud. Constr. Mater., vol. 20, p. e02992, doi: 10.1016/j.cscm.2024.e02992.
- [14] Z. Meriem. (2021). "Experimental and theoretical evaluation of the adsorption process of some polyphenols and their corrosion inhibitory properties on mild steel in acidic media", J. Environ. Chem. Eng., vol. 9, n.º 6, p. 106482, doi: 10.1016/j.jece.2021.106482.

- [15] Z. Ait El Caid. (2024). "Green approach towards the corrosion suppression effect of carbon steel against an aggressive medium of 1 M HCl from peanut shells: Electrochemical examinations coupled with theoretical insights", *Mater. Chem. Phys.*, vol. 316, p. 129081, doi: 10.1016/j.matchemphys.2024.129081.
- [16] S. Kaur y A. Ubeyitogullari. (2023). "Extraction of phenolic compounds from rice husk via ethanol-water-modified supercritical carbon dioxide", *Heliyon*, vol. 9, n.º 3, p. e14196, doi: 10.1016/j.heliyon. 2023.e14196.
- [17] X. Sun. (2024). "Exploring metasequoia glyptostroboides leaf extract as an eco-friendly corrosion inhibitor for Q235 steel", *Int. J. Electrochem. Sci.*, vol. 19, n.º 2, p. 10049, doi: 10.1016/j.ijoes.2024.100494.
- [18] H. Ahchouch. (2024). "From nature to protection: Unleashing the protective potential of Hedera helix leaves against corrosion in harsh acidic environments using experimental and theoretical insights", *Arab. J. Chem.*, vol. 17, n.º 2, p. 105593, doi: 10.1016/j.arabjc.2023.105593.
- [19] S. Elhady, E. G. Zaki, O. E. El-Azabawy, y I. S. Fahim. (2024). "Electrochemical evaluation of green corrosion inhibitor based on ground coffee waste in Petroleum fields", *Results Eng.*, vol. 21, p. 101880, doi: 10.1016/j.rineng.2024.101880.
- [20] G. K. Shamnamol, P. Rugma, S. John, y J. Mary Jacob. (2023). "Unraveling the synergistic effect of cationic and anionic salt on the corrosion inhibition performance of Garcinia gummi-gutta leaf extract against mild steel in HCl medium", *Results Chem.*, vol. 5, p. 100728, doi: 10.1016/j.rechem.2022.100728.
- [21] A. Belakhdar. (2020). "Computational and experimental studies on the efficiency of Rosmarinus officinalis polyphenols as green corrosion inhibitors for XC48 steel in acidic medium", *Colloids Surf. Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 606, p. 125458, doi: 10.1016/j.colsurfa.2020.125458.
- [22] N. J. Mohammed y N. K. Othman. (2020). "Date Palm Seed Extract as a Green Corrosion Inhibitor in 0.5 M HCl Medium for Carbon Steel: Electrochemical Measurement and Weight Loss Studies", *Int. J. Electrochem. Sci.*, vol. 15, n.º 10, pp. 9597-9610, doi: 10.20964/2020.10.45.
- [23] A. Kokalj. (2023). "On the use of the Langmuir and other adsorption isotherms in corrosion inhibition", *Corros. Sci.*, vol. 217, p. 111112, doi: 10.1016/j.corsci.2023.111112.
- [24] X. Liu. (2023). "Corrosion inhibition properties of spinach extract on Q235 steel in a hydrochloric acid medium", *Arab. J. Chem.*, vol. 16, n.º 9, p. 105066, doi: 10.1016/j.arabjc.2023.105066.
- [25] A. O. Alao, O. Sanni, y A. P. Popoola. (2023). "Insight into the anti-corrosive performance of Persea Americana seed extract as a high-efficiency and sustainable corrosion inhibitor for API 5 L X65 pipeline steel in 1 M HCl solution", *Int. J. Electrochem. Sci.*, vol. 18, n.º 9, p. 100248, doi: 10.1016/j.ijoes.2023.100248.
- [26] A. Acidi. (2023). "Examination of the main chemical components of essential oil of Syzygium aromaticum as a corrosion inhibitor on the mild steel in 0.5 M HCl medium", *J. Mol. Liq.*, vol. 391, p. 123423, doi: 10.1016/j.molliq.2023.123423.

- [27] F. A. Zakaria, T. S. Hamidon, y M. H. Hussin. (2022). "Applicability of winged bean extracts as organic corrosion inhibitors for reinforced steel in 0.5 M HCl electrolyte", J. Indian Chem. Soc., vol. 99, n.o 2, p. 100329, doi: 10.1016/j.jics.2021.100329.
- [28] A. Thakur, A. Kumar, S. Sharma, R. Ganjoo, y H. Assad. (2022). "Computational and experimental studies on the efficiency of *Sonchus arvensis* as green corrosion inhibitor for mild steel in 0.5 M HCl solution", Mater. Today Proc., vol. 66, pp. 609-621, doi: 10.1016/j.matpr.2022.06.479.