

Inhibición de la corrosión del acero 1018 en medio salino por *Curcuma longa*

1018 steel corrosion inhibition in chloride media by *Curcuma longa*

DOI: 10.46932/sfjdv3n2-063

Received in: February 15th, 2022

Accepted in: March 1st, 2022

German Chávez Díaz

PhD student

Institución: Universidad Autónoma del Estado de Morelos

Dirección: Av. Universidad 1009, Cuernavaca, Morelos

Correo electrónico: german.chavezd@uaem.edu.mx

Maria Guadalupe Valladares Cisneros

Lecturer-Researcher

Institución: Universidad Autónoma del Estado de Morelos

Dirección: Av. Universidad 1009, Cuernavaca, Morelos

Correo electrónico: mgpevalladares@gmail.com

J. Uruchurtu Chavarín

Professor-Researcher

Institución: Universidad Autónoma del Estado de Morelos

Dirección: Av. Universidad 1009, Cuernavaca, Morelos

Correo electrónico: juch25@uaem.mx

RESUMEN

En el presente trabajo se evaluaron dos extractos de *Curcuma longa* (*C. longa*) como inhibidores verdes de la corrosión del acero al carbono 1018 inmerso en una solución de cloruro de sodio al 3% (p/v) mediante técnicas electroquímicas. Las eficiencias de inhibición se determinaron por Curvas de Polarización Potenciodinámica (CPP) y Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIE). La velocidad de corrosión, el tiempo de residencia y las isotermas de adsorción del inhibidor verde se estimaron para el extracto de mejor eficiencia de inhibición (EI). El empleo de 20 ppm del extracto metanólico de *C. longa* mostró un 93.68 % de eficiencia de inhibición mediante la técnica de EIE, y la velocidad de corrosión se redujo hasta dos órdenes de magnitud, el procesamiento de los datos experimentales se ajustaron a la isoterma de Langmuir, a través de la cual se determinó que el inhibidor verde tiene un comportamiento de tipo mixto. Este trabajo demuestra que *C. longa* tiene potencial de aplicación como inhibidor verde de la corrosión del acero al carbono 1018 en medio salino.

Palabras clave: corrosión, acero, inhibidores verdes, curcuma longa, eficiencia de inhibición.

ABSTRACT

This work presents the evaluation of two *Curcuma longa* (*C. longa*) extracts as green corrosion inhibitors for 1018 carbon steels in chloride solution. 3% (w/v) using electrochemical techniques. Inhibition corrosion efficiency was determined through potentiodynamic polarization curves (CPP) and electrochemical impedance spectroscopy (EIE). Corrosion rate, residence time and green inhibitor adsorption isotherms were obtained for the most suitable extract corrosion efficiency (EI). The use of 20 ppm *C. longa* methanolic extract showed a 93.68% inhibitor efficiency using EIE, and the corrosion rate diminished up two orders of magnitude. Experimental data adjusted to the Langmuir isotherm, and it was

determined a mixed behavior for the green inhibitor. This work demonstrates *C. longa* has a potential application as green corrosion inhibitor for 1018 carbon steel in chloride media

Keywords: steel corrosion, green inhibitors, *curcuma longa*, inhibition efficiency.

1 INTRODUCCIÓN

Los metales y aleaciones, son materiales ampliamente utilizados en diversos sectores industriales principalmente en las instalaciones industriales, centrales eléctricas y plantas de procesos químicos, entre otros: con el transcurso del tiempo éstas instalaciones o estructuras llegan a sufrir deterioro a causa de la corrosión, provocando frecuentemente suspensión de sus procesos, pérdida de eficiencia y funcionamiento de los equipos [1, 2] causando accidentes fatales, incendios, explosiones y liberación de productos tóxicos a la atmósfera, al agua y a la tierra [3, 4].

La corrosión de los materiales metálicos no puede ser erradicada o detenida, sin embargo, puede mitigarse o retardarse. Por lo que existen diversos métodos para retardar el proceso de la corrosión, y resultan interesantes aquellos que interfieren con el mecanismo de la reacción de oxidación, de tal manera que el proceso de la corrosión se vuelve lo más ineficiente posible [5]. Los compuestos que actúan así se conocen como inhibidores de la corrosión, definidos como sustancias que cuando se agregan en pequeñas concentraciones a un entorno, provocan que la velocidad a la que se corroe el material metálico expuesto a ese entorno, se reduce o minimiza [6].

El uso de inhibidores es una de las prácticas más empleadas para prevenir la corrosión, sin embargo la gran mayoría son altamente tóxicos, por lo que presentan un gran impacto ambiental. Es por ello que su uso ha sido regulado y muchos de ellos han salido del mercado, tales como los cromatos, fosfatos y compuestos con arsénico [7].

Esta situación ha favorecido que se potencialicen investigaciones sobre la capacidad de inhibición de la corrosión por compuestos de origen natural conocidos como “inhibidores verdes” debido que a los extractos de plantas se han convertido en una excelente alternativa para mitigar el proceso de la corrosión, por lo que se espera puedan sustituir a los inhibidores sintéticos de la corrosión que aún hoy se comercializan. Así mismo las plantas o especies vegetales son una rica fuente de compuestos químicos naturales biodegradables que pueden extraerse mediante sencillos procedimientos, utilizando solventes de bajo costo y baja toxicidad [8, 9].

Por lo que el presente trabajo se orientó al estudio de la capacidad inhibitoria de la corrosión del acero al carbono AISI 1018 por *Curcuma longa* (*C. longa*), empleada como inhibidor verde de la corrosión.

2 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1 PROBETAS DE TRABAJO

Se utilizó como material de trabajo acero al carbón AISI 1018. Una varilla de acero fue cortada en probetas de 3 cm de longitud, las cuales fueron conectadas a un cable de cobre en un extremo y se encapsularon con resina epóxica comercial dejando expuesta una superficie de 0.28 cm² como nuestra área de trabajo. Cada una de las probetas fue lijada con papel abrasivo (lijas) de 120, 240, 320, 400, y 600 grados consecutivamente antes de cada prueba.

2.2 PREPARACIÓN DE INHIBIDORES NATURALES

De cada uno de los inhibidores verdes se disolvieron 0.5 g del extracto en 250 mL de agua destilada. A partir de esta solución se tomaron alícuotas para realizar pruebas electroquímicas en las siguientes concentraciones de los inhibidores verdes 10, 20, 50, y 100 ppm.

2.3 PRUEBAS ELECTROQUÍMICAS

Una celda convencional de tres electrodos se empleó en la evaluación de los inhibidores verdes. Los electrodos fueron: acero AISI 1018 como electrodo de trabajo electrodo de Ag/AgCl como electrodo de referencia y una barra de grafito se empleó como contraelectrodo. Cada una de las pruebas se realizó por triplicado, al tiempo de inmersión en ausencia y presencia del inhibidor.

La eficiencia de inhibición de la corrosión (EI) de cada inhibidor se calculó empleando los valores electroquímicos obtenidos por curvas de polarización potenciodinámica (CPP) y espectroscopia de impedancia electroquímica (EIE). Para CPP se empleó un rango de potencial de -1200 a 1200 mV, con una velocidad de barrido de 100 mV/s. En EIE se utilizó un rango de frecuencia de 0.01 Hz a 10000 Hz, con una señal sinusoidal de 30 mV. Estas pruebas electroquímicas se realizaron en un Potenciostato Gill ACM Instruments 2000. Los datos experimentales se procesaron con el programa Origin Lab, y se emplearon, la ecuación 1 para determinar la EI por CPP y la ecuación 2 para determinar la EI por EIE. Adicionalmente los resultados obtenidos de la técnica de EIE se procesaron para obtener el tiempo de residencia, la velocidad de corrosión y realización de las isothermas de adsorción.

$$\% EI = \frac{I_{corr0} - I_{corrinh}}{I_{corr0}} \times 100 \quad (1)$$

$$\% EI = \frac{R_{tc} - R_{tc0}}{R_{tc}} \times 100 \quad (2)$$

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LOS INHIBIDORES

3.1.1 Cromatografía en Capa Fina (CCP)

Mediante cromatografía en capa fina expuesta a una longitud de onda de 280 nm luz ultravioleta se observó, para el inhibidor metanólico de *C. longa*; la fluorescencia de tres intensas manchas que revelaron la presencia de tres compuestos mayoritarios. De acuerdo con el reporte de Pothitirat y Gritsanap (2005) mencionaron que en *C. longa* los compuestos mayoritarios corresponden a una mezcla de tres curcuminoides (Figura 1) que los caracteriza la presencia de múltiples enlaces conjugados en su estructura química, motivo por el cual es posible visualizarlos a través de luz ultravioleta [10].

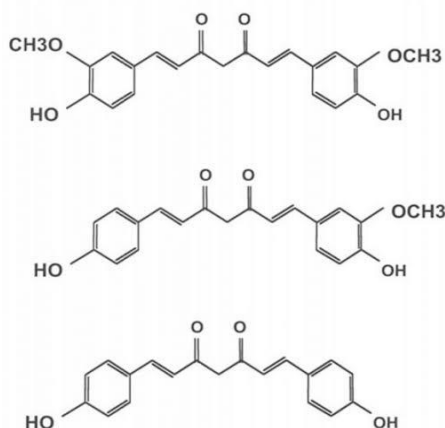
Figura 1. Cromatografía en capa fina de los extractos hexánico y metanólico de *C. longa* (luz UV a 280 nm).



3.1.2 Espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier (FT-IR)

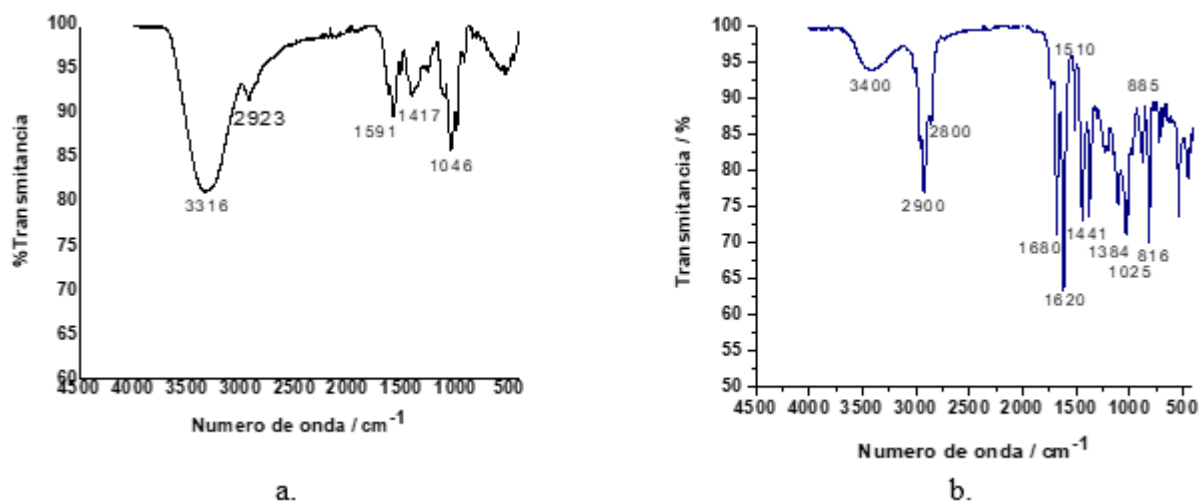
El análisis de FT-IR del Inhibidor metanólico de *C. longa* (IMCL) (Figura 3a) mostró señales de absorción con frecuencias de vibración características para los grupos funcionales de $-\text{OH}$ (3316 cm^{-1}), $-\text{CH}_3$ (sp^3 , 2923 cm^{-1}), y de sistemas de enlaces dobles $\text{C}=\text{C}$ de anillos aromáticos ($>1600\text{ cm}^{-1}$), y una señal característica de $-\text{C}=\text{O}$ (1591 cm^{-1}) de cetonas conjugadas, que confirman la presencia de los curcuminoides, porque estos tienen en su estructura química dos grupos cetona (Figura 2).

Figura 2. Estructuras químicas de los curcuminoides-



Mientras que el FT-IR del inhibidor hexánico de *C. longa* (IHCL) (Figura 3b) muestra vibraciones características para grupos funcionales, -OH, -CH₂, (3400 cm⁻¹ y 2900 cm⁻¹); anillos aromáticos (1620 cm⁻¹), carbonilo (1510 cm⁻¹) y enoles (1025 cm⁻¹) [11].

Figura 3. FTIR de los inhibidores metanólico (a) e inhibidor hexánico (b) de *C.longa*.



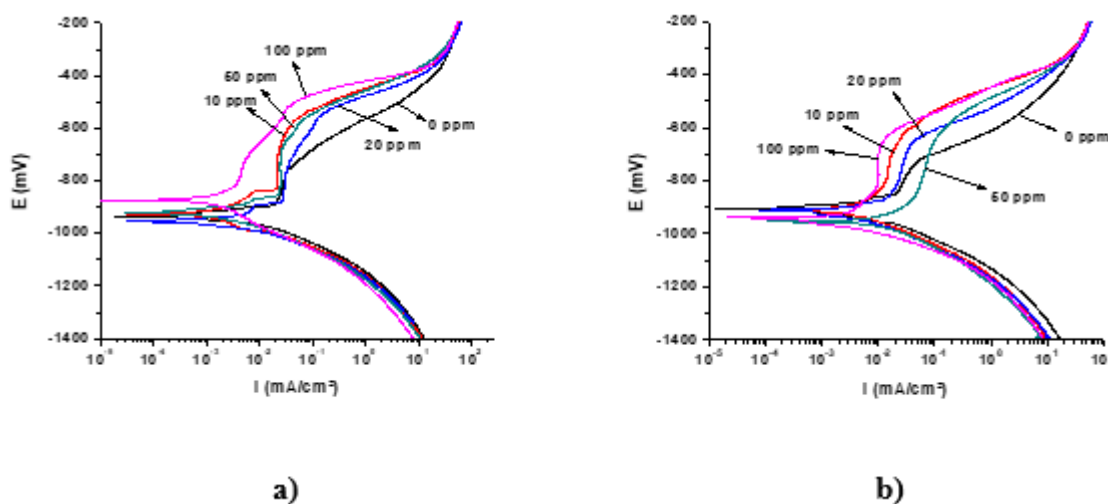
A través de los resultados obtenidos por CCP e FT-IR se logró corroborar para el extracto metanólico de *C. longa*, la presencia de grupos funcionales como alcoholes, carbonilos y anillos aromáticos, que confirmaron la presencia de los curcuminoides en este extracto que se empleó como inhibidor verde.

3.2 PRUEBAS ELECTROQUÍMICAS

3.2.1 Curvas de polarización potenciodinámica (CPP)

Las curvas de polarización potenciodinámica (CPP) de los inhibidores verdes de *C. longa*, (IMCL e IHCL), se muestran en la Figura 4.

Figura 4. CPP inhibidores metanólico (a) y hexánico (b) de *C. longa*



En ambos gráficos (Figura 4) se puede observar que las ramas catódicas no presentan cambios significativos. Sin embargo las ramas anódicas muestran una disminución de las densidades de corrosión (I_{corr}), y se mantienen en rango de potencial más amplio que cambia de 100 mV hasta 300 a 400 mV. El potencial de corrosión se mantiene entre un rango de -900 mV -950 mV. Sin embargo el aumento de la concentración de inhibidor en el sistema produjo un cambio en el potencial de picado del acero pasando de -700 mV a valores más nobles aproximadamente -300 mV, este cambio puede ser atribuido a la formación de una capa protectora de la corrosión más estable [12].

En las tablas 1 y 2 se muestran los resultados obtenidos de las CPP empleando el método de extrapolación de Tafel, la I_{corr} de pasivación del acero fue tomada como la I_{corr} del sistema, con lo que se corrobora la disminución en dos órdenes de magnitud de los valores de la I_{corr} con el empleo del inhibidor metanólico (IMCL) y un orden de magnitud con el inhibidor hexánico (IHCL). Observando que la mejor eficiencia de inhibición de la corrosión se logró a una concentración de 100 ppm, con cualquiera de los dos inhibidores. Sin embargo, el inhibidor metanólico de *C. longa* mostró mayor protección a la corrosión para el acero al carbono AISI 1018 en medio salino, siendo el porcentaje de la EI de 93.73 % con 100 ppm del IMCL.

Tabla 1: Eficiencias de inhibición para IMCL

IMCL [ppm]	E _{corr} (mV)	I _{corr} (A/cm ²)	β _c (mV/dec)	% EI
0	-905.46	0.0273	-118.08	---
10	-925.43	0.0208	-129.46	24.58
20	-910.43	0.0295	-127.22	---
50	-953.84	0.0245	-146.89	10.48
100	-940.26	0.0046	-129.55	93.73

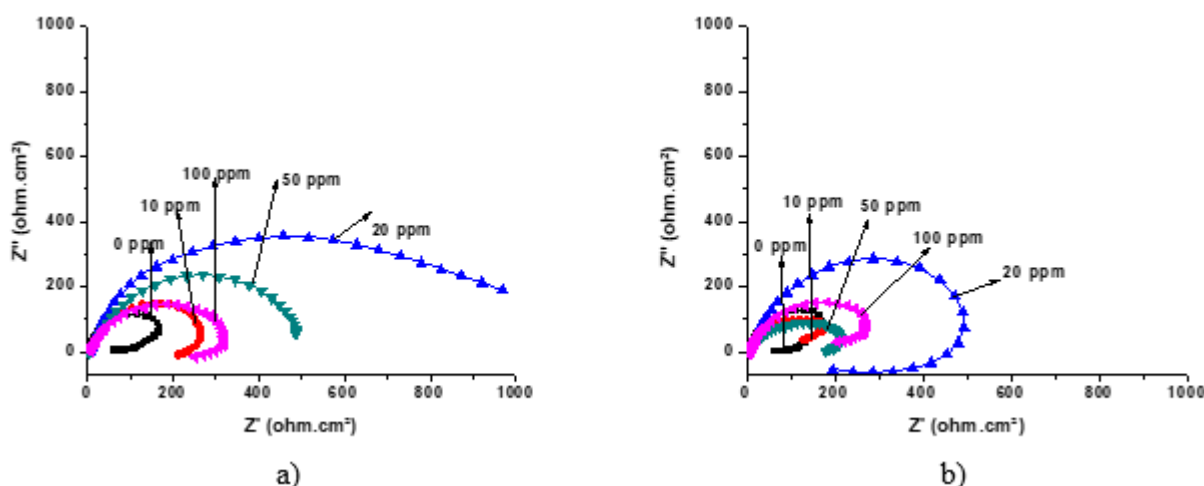
Tabla 2. Eficiencias de inhibición para el IHCL

IHCL [ppm]	E _{corr} (mV)	I _{corr} (A/cm ²)	β _c (mV/dec)	% EI
0	-905.46	0.0273	-118.08	---
10	-911.77	0.0152	-129.46	44.25
20	-909.90	0.0266	-127.22	2.67
50	-954.27	0.0657	-146.89	---
100	-910.75	0.0102	-129.55	62.57

3.2.2 Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIE)

En la Figura 5 se muestran los diagramas de Nyquits del efecto de IMCL e IHCL de *C. longa*, se observan semicírculos deprimidos los cuales a bajas frecuencias muestran un rizo inductivo, este comportamiento se debe a que el proceso de inhibición de la corrosión puede estar siendo controlado por las adsorción de especies químicas que ocurren entre la interface metal-inhibidor y corrosión localizada [13]. En ambos gráficos se observa que el incremento en el diámetro de los semicírculos con respecto al blanco se genera por el incremento de la concentración del inhibidor. A 20 ppm de IMCL e IHCL se obtiene el mayor diámetro del semicírculo para ambos casos.

Figura 5. Diagramas de Nyquist de la evaluación de IMCL y IHCL para el acero AISI 1018 en solución de NaCl.



Si bien, ambos inhibidores de *C. longa* muestran actividad en el proceso de mitigación de la corrosión al emplearse a distintas concentraciones, el empleo de 20 ppm del inhibidor metanólico mostró la mayor EI a la corrosión del acero al carbono AISI 1018 en medio salino, las EI calculadas para ambos inhibidores se muestran en las tablas 3 y 4.

Estas condiciones (concentración y EI) comparadas con valores reportados con otros inhibidores verdes que se han empleado para reducir la corrosión del acero al carbono en medios con cloruros, no son competitivas con los valores aquí reportados. Algunos trabajos reportan EI superiores al 90 % sin embargo las concentraciones de los inhibidores verdes empleados son sumamente elevadas. El extracto acuoso del comino (*Cuminum cyminum*) empleado en una concentración de 40,000 ppm [14] para alcanzar una EI del 98 %. El empleo de 2000 ppm del extracto recuperado de la semilla del aguacate (*Persea americana*) como inhibidor de la corrosión del acero al carbono en ácido clorhídrico 1 M, rindió una EI del 93 % [15].

Como puede observarse, si bien existen reportes del empleo de inhibidores verde de la corrosión en medios con cloruros, las concentraciones empleadas son excesivas, lo cual repercute directamente en la alteración del entorno de donde se obtienen los inhibidores y el medio donde está ocurriendo el fenómeno de la inhibición de la corrosión, esto puede repercutir en los costos de producción, mantenimiento de la maquinaria o ductos donde pueda ser aplicado dicho inhibidor.

Tabla 3. Eficiencias de inhibición por EIE de IMCL

IMCL [ppm]	Rtc (Ω cm ²)	Cdl (F cm ⁻²)	% EI
0	60.95	7.79E-03	---
10	206.58	1.18E-02	70.49
20	964.71	9.93E-04	93.68
50	482.11	2.07E-02	87.36
100	244.39	1.26E-02	75.06

Tabla 4. Eficiencias de inhibición por EIE de IHCL

IHCL (ppm)	Rtc(Ω cm ²)	Cdl(F cm ⁻²)	% EI
0	57.34	8.28E-03	-----
10	123.94	1.23E-02	53.74
20	190.90	1.01E-02	69.96
50	171.46	1.77E-02	67.12
100	205.10	3.70E-03	72.04

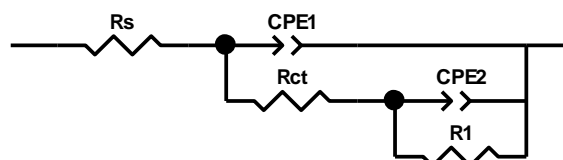
La presencia de un rizo inductivo en la mayoría de los sistemas es un comportamiento que se puede atribuir a que la capa de productos de corrosión que se formó a pesar de ser más estable, es porosa y da paso a corrosión localizada. El efecto que realizan los inhibidores sobre la interface metal solución en EIE, puede ser comparable con los cambios sobre el potencial de picado en el sistema, que se observó con la técnica de curvas de polarización.

3.2.3 Circuito equivalente

Los resultados obtenidos con el inhibidor metanólico fueron simulados empleando el programa Z_{View} , en la Figura 6 se muestra el circuito equivalente que correspondió al mejor ajuste, logrado mediante la consideración de tres resistencias y dos elementos de fase constante. Las resistencias corresponden a la resistencia a la solución (R_s), la resistencia a la transferencia de carga (R_{ct}), y la resistencia de la película formada por los productos de corrosión o los productos de corrosión en combinación con el inhibidor

(R1). Se requirieron dos elementos de fase constante, el primero corresponde a la formación de la capa protectora en la superficie del metal (CPE1) y el segundo referente a los procesos difusivos y de corrosión localizada en el sistema (CPE2) [16].

Figura 6. Circuito equivalente empleado en la simulación del inhibidor metanólico



3.2.4 Tiempo de residencia

Se determinó el tiempo en el cual el inhibidor permanece activo y protegiendo en contra la corrosión al metal en el medio agresivo, conservando su eficiencia. En la Figura 7 se muestra el tiempo de residencia del extracto metanólico *C. longa* en el cual alcanza la mayor eficiencia de inhibición, este inhibidor se mantiene activo durante 6 h. Posteriormente la EI disminuye al incrementarse el tiempo de exposición y decae a un valor similar al blanco a las 72 horas.

Figura 7. Tiempo de residencia de 20 ppm del IMCL

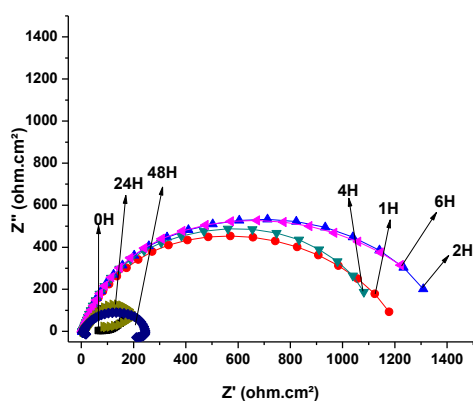
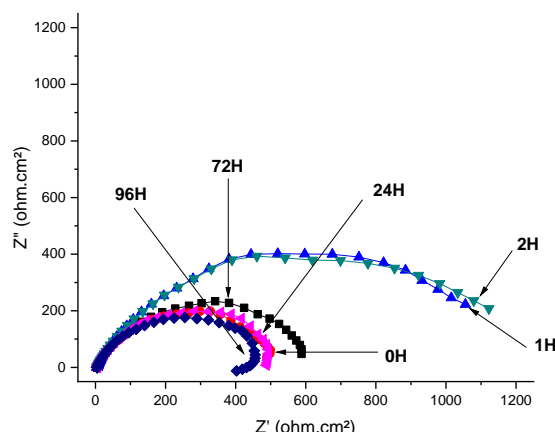


Tabla 5. Eficiencia de inhibición del IMCL en el tiempo

<i>t</i> (H)	$R_{ct}(\Omega \text{ cm}^2)$	$C_{dl}(\text{F cm}^{-2})$	%EI
BCO	60.95	7.79E-03	---
1	1173.46	1.65E-03	94.81
2	1304.96	1.48E-03	95.33
4	1075.86	1.80E-03	94.33
6	1216.09	1.59E-03	94.99
24	78.16	2.48E-02	22.02
48	192.68	1.60E-02	68.37

Pasadas las 72 horas, se agregó más inhibidor IMCL a la celda electroquímica, lo necesario para que la concentración fuera nuevamente de 20 ppm, como resultado se observó que la actividad inhibitoria se reactiva durante dos horas más, pasado este tiempo la capa protectora del inhibidor se inactiva o se desprende dando paso a la corrosión localizada. En la Figura 8 se muestra el diagrama de Nyquist para el sistema con los 20 ppm extra del inhibidor.

Figura 8. Tiempo de residencia de 20 ppm extra del IMCL



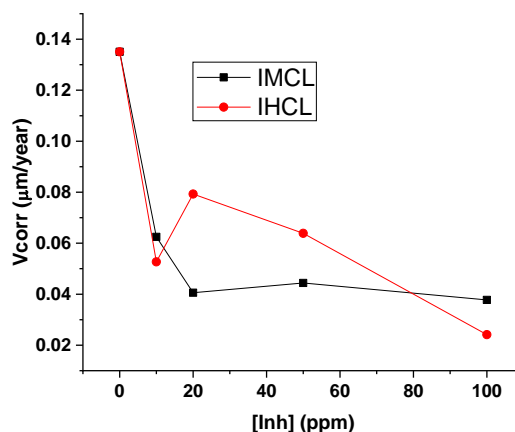
3.2.5 Velocidad de corrosión

La velocidad de corrosión empleando el inhibidor metanólico de *C. longa* en NaCl, fue determinado con la ecuación 3.

$$V_{corr} = k \frac{ia}{nD} \quad (3)$$

El efecto sobre la velocidad de corrosión (V_{corr}) del acero AISI 1018 en medio salino para ambos inhibidores se muestra en la Figura 9, donde se observa que la V_{corr} disminuye empleando ambos inhibidores en forma individual. Sin embargo, 20 ppm del inhibidor metanólico (IMCL) disminuyeron la velocidad en dos órdenes de magnitud, y está velocidad se mantiene constante durante el tiempo de residencia. Por su parte 20 ppm del extracto hexánico también reducen la V_{corr} , sin embargo en algunas investigaciones se menciona que al trabajar con inhibidores naturales la velocidad de corrosión se altera y se observan comportamientos no ideales, porque al tratarse el inhibidor verde de una mezcla de compuestos, estos pueden competir entre sí por para acceder hacia la interface metal-solución y continuar compitiendo por interaccionar favorablemente con la superficie del metal; lo cual ocasiona variaciones en los registros y adquisición de datos, lo que se ha denominado concentración crítica del inhibidor verde, y produciendo un resultado totalmente diferente al esperado [17,18].

Figura 9. Velocidad de Corrosión de IMCL e IHCL



3.2.6 Isotermas de Adsorción

Con los datos de EIE se realizaron diferentes modelados de isotermas de adsorción tras calcular los valores de cobertura de la superficie (θ), las isotermas calculadas fueron Langmuir (Ec. 4), Frumkin (Ec. 5) y Flory-Huggins (Ec. 6).

$$\text{Langmuir} \quad \left(\frac{\theta}{C}\right) = \frac{1}{K} + C \quad (4)$$

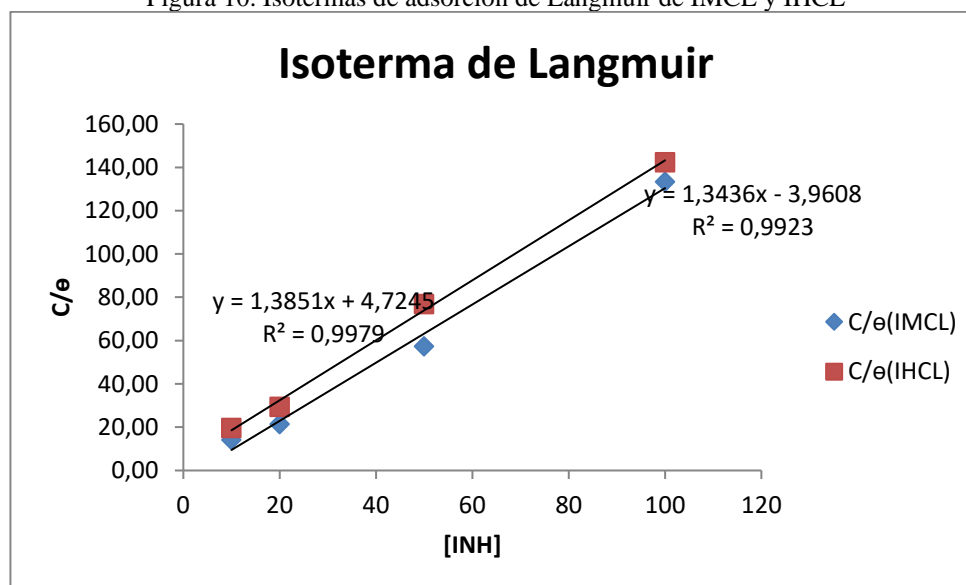
$$\text{Frumkin} \quad \log C = \log\left(\frac{\theta}{1-\theta}\right) + A\theta + B \quad (5)$$

$$\text{Flory-Huggins} \quad \log\left(\frac{\theta}{C}\right) = \log(K) + x \log(1-\theta) \quad (6)$$

En la Figura 10 se muestra la isoterma de Langmuir, siendo la isoterma que mejor ajuste presento. Ambos inhibidores presentaron un valor de R^2 superior a 0.99. El valor de la cobertura de la superficie metálica (θ) se calculó empleando la ecuación 7.

$$\theta = \frac{EI}{100} \quad (7)$$

Figura 10. Isotermas de adsorción de Langmuir de IMCL y IHCL



Los parámetros termodinámicos calculados a partir de los datos de la isoterma de Langmuir, se muestran en la Tabla 6. La constante de adsorción (K_{ads}) se obtuvo del inverso de la pendiente de la recta, y para calcular la energía libre de Gibbs (ΔG_{ads}) se empleó la ecuación 8, se realizó un cambio en las unidades de la K_{ads} antes de calcular la ΔG_{ads} .

$$\Delta G_{ads} = -RT \ln(K_{ads}) \quad (8)$$

Tabla 6. Parámetros cinéticos de IMCL e IHCL

Inh	K_{ads}		ΔG_{ads} (KJ/mol)
	(L/mg)	(L/mol)	
IMCL	0.7443	2.74E+05	-31.04
IHCL	0.7220	2.66E+05	-30.96

Los valores obtenidos sugieren que el comportamiento de los inhibidores de *C. longa* es una combinación de procesos, por lo que los inhibidores actúan en un tipo mixto, esto por tratarse de mezclas de compuestos orgánicos de origen natural [19, 20, 21, 22].

4 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este trabajo, muestran que el extracto metanólico de *C. longa* tiene un potencial de aplicación como inhibidor verde la corrosión para el acero al carbono AISI 1018 inmerso en una solución al 3 % de NaCl.

La velocidad de corrosión se redujo dos órdenes de magnitud cuando se empleó el inhibidor metanólico *C. longa* en una concentración de 20 ppm. El tiempo de residencia del IMCL fue de 6 horas.

La isoterma de adsorción de Langmuir para ayudar a establecer que el inhibidor metanólico de *C. longa* muestra un comportamiento mixto.

AGRADECIMIENTOS

Los autores externan su gratitud al CONACYT por el apoyo financiero otorgado para el desarrollo de esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] J. G. Speight, The chemistry and technology of petroleum. CRC press, (2014).
- [2] A.M., Abdel-Gaber, B.A., Abd-El-Nabey, I.M., Sidahmed, A.M. El-Zayady, y M. Saadawy., Inhibitive action of some plant extracts on the corrosion of steel in acidic media, pp. 2765–2779, vol. 48, Corros. Sci, (2006).
- [3] D., Chen, K., Howe, J., Dallman, Bruce, Corrosion of aluminum in the aqueous chemical environment of a loss-of-coolant accident at a nuclear power plant, pp. 1046–1057, vol. 50. Corros. Sci, (2008),
- [4] C., Restrepo, J., Simonoff, R., Zimmerman, Causes, cost consequences, and risk implications of accidents in US hazardous liquid pipeline infrastructure, pp. 38-50, vol. 2, Int. J. Crit. Infrastruct. Prot., (2009).
- [5] J., Avila, & J. Genescá, Más allá de la herrumbre. FCE-Fondo de Cultura Económica, (1996).
- [6] P., Roberge, Handbook of corrosion engineering, McGraw Hill, USA, (1999).
- [7] A., Ismail. A review of green corrosion inhibitor for mild steel in seawater, pp. 8710-8714, vol. 14, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, (2016).
- [8] G C., Dariva, F, A., Galio, Corrosion Inhibitors – Principles, Mechanisms and Applications, pp. 365-379, vol. 16, Developments in Corrosion Protection, (2014).
- [9] R. M. Palou, O. Olivares-Xomelt, N. V. Likhanova y M. Aliofkhazraei, Environmentally friendly corrosion inhibitors., pp. 431-465, Ed., InTech, In Developments in corrosion protection., (2014).
- [10] W., Pothitirat, & W., Gritsanapan, Quantitative analysis of curcumin, demethoxycurcumin and bisdemethoxycurcumin in the crude curcuminoid extract from *Curcuma longa* in Thailand by TLC densitometry, pp. 23-30, vol. 32, Mahidol University Journal of Pharmaceutical Sciences, (2005).
- [11] H., Pawar, M., Karde, N., Mundle, P., Jadhav, & K., Mehra. Phytochemical evaluation and curcumin content determination of turmeric rhizomes collected from Bhandara District of Maharashtra (India), pp. 588-591, vol. 8Med. Chem, (2014).
- [12] N., Upadhyay, M. G., Pujar, S. S., Singh, N. G., Krishna, C., Mallika, & U., Kamachi Mudali, Evaluation of the effect of molybdenum on the pitting corrosion behavior of austenitic stainless steels using electrochemical noise technique., pp. 1320-1334, vol. 73, Corrosion, (2017).
- [13] J. L., Ramírez Reyes, J., Uruchurtu Chavarín, Métodos Experimentales en la Ciencia de la Corrosión: Impedancia Electroquímica, Ciudad Universitaria D.F., (2010).
- [14] V., Sribharathy y S., Rajendran, *Cuminum cyminum* extracts as eco-friendly corrosion inhibitor for mild steel in seawater, pp. 1-7, ISRN Corrosion, (2013).
- [15] M., Belkhaouda, L., Bammou, R., Salghi, A., Zarrouk, E. E., Ebenso, H., Zarrok, & B., Hammouti, Inedible avocado extract: an efficient inhibitor of carbon steel corrosion in hydrochloric acid, pp. 10987-10999, vol. 8, International Journal of Electrochemical Science, (2013).

- [16] E. M., Esparza Zúñiga, V., Rodríguez, V. E., Reyes Cruz, & J., Uruchurtu Chavarín, Efecto del pH en la corrosión de acero al carbono en presencia de un medio amargo., pp. 139-145, vol. 25, Superficies y vacío, (2012).
- [17] S. C., Roy, S. K., Roy, & S. C., Sircar, Critique of inhibitor evaluation by polarization measurements, pp. 102-104, vol. 23, British Corrosion Journal, (1988).
- [18] E., Sarmiento-Bustos, J. G., Rodriguez, J., Uruchurtu, G., Dominguez-Patiño, & V. M., Salinas-Bravo, Effect of inorganic inhibitors on the corrosion behavior of 1018 carbon steel in the LiBr+ ethylene glycol+ H₂O mixture., pp. 2296-2303, vol. 50, Corrosion Science, (2008).
- [19] H. Z., Alkathlan, M., Khan, M. M. S., Abdullah, A. M., AlMayouf, A. Y., Badjah-Hadj-Ahmed, Z. A., AlOthman, & A. A. Mousa, Anticorrosive assay-guided isolation of active phytoconstituents from *Anthemis pseudocotula* extracts and a detailed study of their effects on the corrosion of mild steel in acidic media, pp. 54283-54292, vol. 5, RSC Advances, (2015).
- [20] P., Sakunthala, S. S., Vivekananthan, M., Gopiraman, N., Sulochana, & A. R., Vincent, Spectroscopic investigations of physicochemical interactions on mild steel in an acidic medium by environmentally friendly green inhibitors., pp. 251-263, vol. 16, Journal of Surfactants and Detergents, (2013).
- [21] M., Gopiraman, P., Sakunthala, D., Kesavan, V., Alexramani, I. S., Kim, & N., Sulochana, An investigation of mild carbon steel corrosion inhibition in hydrochloric acid medium by environment friendly green inhibitors., pp. 15-26, vol. 9, Journal of Coatings Technology and Research, (2012).
- [22] A., Bouyanzer, B., Hammouti, & L. Majidi, Pennyroyal oil from *Mentha pulegium* as corrosion inhibitor for steel in 1 M HCl., pp. 2840-2843, vol. 23, Materials Letters, (2006).