

Evaluación del extracto acuoso de *Artemisia ludoviciana* Nutt. como inhibidor verde de la corrosión del acero en ácido sulfúrico

Evaluation of the aqueous extract of *Artemisia ludoviciana* Nutt. as a green inhibitor of steel corrosion in sulfuric acid

Haniel Nephtalí Flores-Cortez¹, Rosa Elba Núñez-Jaquez²,
Carlos Paulino Barrios-Durstewitz³, Adrián Bórquez-Mendivil⁴,
Juan Pablo Flores-De los Ríos⁵

Resumen

La corrosión representa un gran problema en diversas industrias, desde la construcción hasta la generación de energía. Tradicionalmente se han empleado inhibidores sintéticos para reducirla; sin embargo, su toxicidad y efectos ambientales adversos han impulsado la búsqueda de alternativas sostenibles. En este contexto, el presente estudio evaluó el potencial del extracto acuoso de *Artemisia ludoviciana* (variante mexicana) como inhibidor “verde” de la corrosión del acero en medio ácido (H_2SO_4 1 M). El extracto se obtuvo mediante el método Soxhlet, utilizando agua destilada como disolvente, y se analizó su desempeño a diferentes concentraciones mediante pruebas de pérdida de peso, espectroscopía de impedancia electroquímica, resistencia a la

polarización y polarización potenciodinámica. Los resultados mostraron una eficiencia de inhibición superior al 90% con una concentración del 5% v/v, indicando una notable capacidad del extracto para reducir la velocidad de corrosión. Las mediciones confirmaron que el efecto inhibidor aumenta con la concentración, mientras que los estudios de polarización mostraron un comportamiento de tipo mixto con predominio anódico. La adsorción del extracto sobre la superficie del acero siguió la isoterma de Langmuir, sugiriendo la formación de una monocapa protectora. En conjunto, los hallazgos demuestran que *A. ludoviciana* es una alternativa eficaz, ecológica y sostenible a los inhibidores convencionales, contribuyendo al aprovechamiento responsable de recursos naturales y al desarrollo de

¹Universidad Autónoma de Sinaloa

²Universidad Autónoma de Sinaloa

³Universidad Autónoma de Sinaloa

⁴Universidad Autónoma de Sinaloa

⁵Tecnológico Nacional de México

tecnologías más limpias para la protección de materiales metálicos.

Palabras clave: Corrosión, Inhibidor verde, *Artemisia ludoviciana*, Acero al carbono, Medio ácido.

Abstract

Corrosion represents a major problem in diverse industries, from construction to energy generation. Synthetic inhibitors have traditionally been used to reduce corrosion; however, their toxicity and adverse environmental effects have prompted the search for sustainable alternatives. In this context, the present study evaluated the potential of the aqueous extract of *Artemisia ludoviciana* (Mexican variant) as a "green" inhibitor of steel corrosion in an acidic medium (1M H₂SO₄). The extract was obtained by the Soxhlet method, using distilled water as a solvent, and its performance was analyzed at different concentrations using weight loss tests, electrochemical impedance

spectroscopy, polarization resistance, and potentiodynamic polarization. The results showed an inhibition efficiency greater than 90% at a concentration of 5% v/v, indicating a remarkable ability of the extract to reduce corrosion rates. The measurements confirmed that the inhibitory effect increases with concentration, while polarization studies showed a mixed-type behavior with anodic predominance. The adsorption of the extract onto the steel surface followed the Langmuir isotherm, suggesting the formation of a protective monolayer. Overall, the findings demonstrate that *A. ludoviciana* is an effective, environmentally friendly, and sustainable alternative to conventional inhibitors, contributing to the responsible use of natural resources and the development of cleaner technologies for the protection of metallic materials.

Keywords

Corrosion, Green inhibitor, *Artemisia ludoviciana*, Carbon steel, Acid medium

INTRODUCCIÓN

La extracción de recursos forestales, tanto maderables como no maderables, no es únicamente un proceso económico: es un punto de encuentro vital entre la sociedad y la naturaleza (Torralba et al., 2018). Estos recursos sostienen desde los oficios más antiguos hasta las industrias más innovadoras, y al mismo tiempo inspiran reflexiones profundas sobre nuestra capacidad de construir un futuro sustentable. En ellos convergen debates sobre la conservación de la biodiversidad, la resiliencia de comunidades rurales y urbanas, y la responsabilidad de nuestras decisiones colectivas (Daily et al., 2009). Más allá de ser fuentes de materiales de energía, alimento, fibras y compuestos bioactivos, los recursos forestales encarnan vínculos culturales y económicos que nos revelan cómo las sociedades han aprendido, y aún buscan organizar su relación con el entorno en un mundo marcado por crecientes presiones ambientales. En este sentido, los sistemas forestales son reconocidos como espacios donde convergen valores ecológicos, sociales y culturales, reflejando la

interacción dinámica entre los seres humanos y los ecosistemas en el contexto de los desafíos globales de sostenibilidad (Berkes, 2017).

En este marco, los compuestos químicos de origen vegetal han adquirido especial relevancia en la transición hacia sistemas productivos sustentables, al ofrecer alternativas renovables y de bajo impacto ambiental frente a los insumos sintéticos convencionales. Su uso contribuye a la innovación en sectores como la agricultura, la salud, la industria y la energía, promoviendo enfoques basados en la bioeconomía y la valorización de los recursos naturales, así como el desarrollo de procesos más eficientes y ambientalmente responsables (Clark et al., 2012). Mientras que en la industria moderna los ácidos se utilizan ampliamente por sus propiedades químicas, desempeñando un papel esencial como agentes de limpieza, en la producción de productos químicos, en el decapado de metales y en la refinación de petróleo, entre otras aplicaciones (Onukwuli et al., 2021), lo anterior trae consigo la corrosión de los metales, el cuál es un fenómeno que genera costos económicos, riesgos ambientales y desafíos tecnológicos. Este problema se ha enfrentado mediante el uso de inhibidores de corrosión, una técnica popular para prevenir o mitigar la velocidad de corrosión de sustratos metálicos en entornos ácidos (Zaferani et al., 2013). Los inhibidores de corrosión son sustancias que, al añadirse en pequeñas concentraciones a medios corrosivos, disminuyen o previenen la reacción del metal con el medio (Raja y Sethuraman, 2008). Recientemente, el uso de sustancias tóxicas como inhibidores se ha visto limitado debido a su amenaza ambiental, así como por el fortalecimiento de regulaciones orientadas a la protección de la salud humana y los ecosistemas, lo que ha impulsado la búsqueda de alternativas sostenibles y biodegradables basadas en principios de química verde (Verma et al., 2021). Algunas organizaciones limitaron el uso de inhibidores químicos tóxicos, por lo que los inhibidores no tóxicos y naturales han cobrado importancia nuevamente debido a su naturaleza ecológica, fácil disponibilidad y fuentes renovables (Li et al., 2014). Debido a los conocidos efectos peligrosos de la mayoría de los inhibidores de corrosión sintéticos, se ha optado por el uso de productos naturales (Sheydaei, 2024). Recientemente, los extractos de plantas (considerados recursos forestales no maderables) se han posicionado como una fuente aceptable para una amplia gama de inhibidores (Barbu et al., 2025). Los extractos de plantas se consideran una fuente de compuestos químicos naturales que pueden extraerse mediante procedimientos simples y económicos (Abdel Gaber et al., 2006). Las propiedades de inhibición de los extractos de plantas se atribuyen generalmente a sus sustancias orgánicas complejas, como carbohidratos, alcaloides, aminoácidos y taninos ya que estos compuestos

orgánicos contienen átomos de N, S, O y grupos funcionales polares como dobles enlaces conjugados o anillos aromáticos como los principales centros de adsorción (Nnanna et al., 2013). La adsorción en la interfaz metal-solución suele ser el paso primario en la acción de los inhibidores de corrosión orgánicos en soluciones ácidas (Zhao et al., 2023). Las fuerzas de atracción entre el adsorbato y el metal son necesarias en los procesos de adsorción, según el tipo de fuerzas, la adsorción puede ser fisisorción, quimisorción o ambas (Hassan et al., 2007). En los últimos años, algunos extractos de plantas se han estudiado como inhibidores efectivos de la corrosión del acero en soluciones ácidas, como *Xylopiya cayennensis* (Chevalier et al., 2019), hojas de papaya (Tan et al., 2021), *Petroselinum sativum* (perejil) (Benarioua et al., 2019), *Malva sylvestris* (Tehrani et al., 2021) y otros (Kadhim et al., 2021).

Contribuyendo al interés actual en inhibidores de corrosión no tóxicos y respetuosos con el medio ambiente, este estudio tuvo como objetivo evaluar la eficiencia inhibidora del extracto acuoso de *Artemisia ludoviciana* sobre acero al carbono en solución de H_2SO_4 1 M, con el fin de determinar su efecto sobre parámetros electroquímicos de corrosión, su mecanismo de adsorción y su viabilidad como alternativa ecológica frente a inhibidores convencionales.

Esta planta se seleccionó debido a que especies del género *Artemisia* han demostrado actividad inhibidora de corrosión significativa en investigaciones previas, atribuido a su contenido de compuestos fenólicos y flavonoides (Okafor, et al., 2012; Karki, et al., 2023).

Artemisia ludoviciana Nutt., conocida comúnmente como estafiate o artemisia mexicana (Figura 1), es una planta herbácea perenne aromática. Presenta hojas alternas, sésiles o con pecíolo corto, que pueden ser enteras o finamente divididas. Las hojas son inicialmente blanco-tomentosas en ambas superficies; sin embargo, con la madurez el haz puede volverse glabro o ligeramente pubescente, mientras que el envés permanece densamente pubescente, generando una marcada diferencia de color entre ambas caras (Suarez, 2022). Esta especie pertenece a un género de más de 200 especies, distribuidas en regiones templadas secas del mundo, sus flores se agrupan en cabezuelas paniculadas o racemosas, a menudo inclinadas, con un involucro ovoide, campanulado o hemisférico compuesto por brácteas dispuestas en varias series. Las flores periféricas pueden ser femeninas y fértiles o infértiles, mientras que las flores del disco son hermafroditas o funcionalmente masculinas, con corolas campanuladas o tubulares (Rzedowski, 2021).

Con base en lo anterior, *A. ludoviciana* (estafiate o artemisia mexicana), recurso forestal no maderable de amplia distribución en regiones templadas semiáridas, se posiciona como un ejemplo representativo del aprovechamiento sustentable de la biodiversidad. Su potencial productivo y funcional permite articular conservación, innovación tecnológica e impacto social. En este contexto, la presente investigación la adopta como objeto de estudio, con el propósito de generar conocimiento que contribuya a su valorización y uso responsable.

Figura 1.

Artemisia ludoviciana, variante mexicana



Nota: Imagen obtenida del archivo del autor

MÉTODOS Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

Preparación de los especímenes metálicos

El material utilizado en este estudio fue acero al carbono A-36, en la Tabla 1 se muestra su composición, con un contenido de carbono del 0.26 %. Los especímenes elaborados para los ensayos de pérdida de peso de acuerdo con la norma ASTM G 31-72 (ASTM, 1990) fueron placas metálicas de acero A-36, con dimensiones de 15.0 mm × 10.0 mm × 1.0 mm. Por otro lado, también se prepararon especímenes para las pruebas electroquímicas, los cuales fueron embebidos en resina epóxica dejando un área expuesta de 10.0 mm². Todos los especímenes fueron pulidos utilizando lijas de

carburo de silicio de grano 220, 400, 600 y 1000 para la obtención de una superficie lisa y uniforme. Posteriormente se lavaron con agua destilada, se desengrasaron con metanol y se secaron. Finalmente se almacenaron en un desecador hasta que fueron utilizados.

Tabla 1.
Composición química de los cupones de acero

Acero	Composición química (% peso)					
	C	Mn	P	S	Si	Fe
A-36	0.26	0.60 - 0.90	0.04	0.05	0.40	Balance

Nota: Elaboración propia

Obtención del extracto de *A. ludoviciana* (AL)

Las hojas secas de *A. ludoviciana* se lavaron con agua destilada e hipoclorito de sodio para eliminar impurezas y bacterias; posteriormente se dejaron secar a la sombra. Las hojas secas se molieron hasta obtener un polvo fino antes del proceso de extracción con disolvente. Se obtuvo el extracto a partir de 10 g de polvo de AL en 300 ml de agua destilada utilizando un aparato Soxhlet, durante 4 horas. Tras la extracción, la solución se enfrió y filtró, obteniendo el extracto de *A. ludoviciana* (EAL).

Preparación del medio ácido

Se utilizó una solución de H₂SO₄ 1M, y los diferentes medios de exposición se prepararon mediante la adición de varias concentraciones del EAL las cuales fueron de 0, 1.0, 2.5, 5.0, 7.5 y 10.0 % volumen/volumen (v/v).

Evaluación por pérdida de peso

Los especímenes metálicos fueron expuestos en el medio de ácido sulfúrico sin y con presencia del EAL, durante 24 h. Los especímenes se extrajeron, enjuagaron con agua y metanol, secaron y se almacenaron en desecadores. La pérdida de peso se determinó según la norma ASTM G 31-72 (ASTM, 1990) determinando el peso del espécimen antes y después de la exposición al medio con inhibidor. La eficiencia de inhibición (EI) (%) se determinó mediante la ecuación (1) (Saxena et al., 2018).

$$EI (\%) = \frac{W_0 - W_{inh}}{W_0} \times 100 \quad (1)$$

Dónde: W_0 y W_{inh} son el peso del metal en ausencia y presencia del extracto, respectivamente.

Pruebas Electroquímicas

Las pruebas electroquímicas se realizaron en una celda electroquímica de tres electrodos. El arreglo experimental consistió en electrodo de trabajo de acero A-36, un electrodo de referencia de calomel saturado (ECS) y una varilla de grafito como electrodo auxiliar. Se empleó un potencióstato/galvanostato Gill de ACM Instruments.

Mediciones de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIE)

Las mediciones de EIE se llevaron a cabo utilizando señales de corriente alterna con una amplitud de 20 mV, en el rango de frecuencia de 10.0 kHz a 1.0 Hz. La eficiencia de inhibición EI (%) se calculó utilizando la ecuación (2) (Haldhar et al., 2018a).

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

Dónde: R_{ct} y R_{ctinh} son la resistencia de transferencia de carga en ausencia y presencia del extracto, respectivamente.

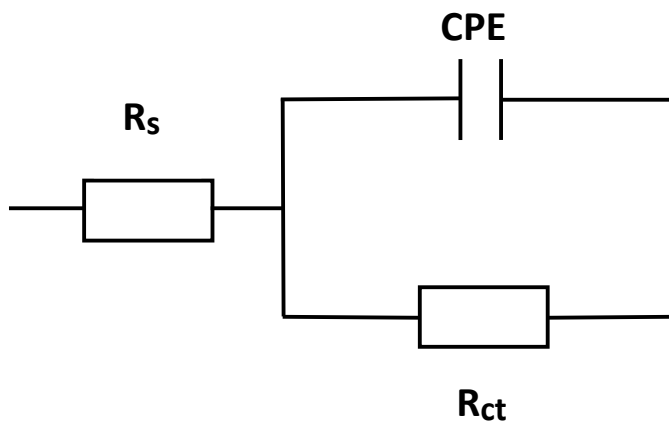
Adicionalmente, los datos obtenidos se ajustaron al circuito de Randles que se muestra en la (Figura 2) usando el software EIS Spectrum Analyzer 1.0 (Pomerantsev, 2005).

Mediciones de Resistencia a la Polarización Lineal (RPL)

Se realizaron mediciones de RPL desde un potencial catódico de -20 mV cercano al potencial de circuito abierto (OCP) hasta un potencial anódico de +20 mV cercano a OCP, a una velocidad de barrido de 10 mV/s para estudiar la resistencia a la polarización. La eficiencia de inhibición EI (%) se calculó mediante la ecuación (3) (Mourya, 2014).

Figura 2.

Circuito de Randles utilizado para ajustar datos



Nota: Elaboración propia

Mediciones de Resistencia a la Polarización Lineal (RPL)

Se realizaron mediciones de RPL desde un potencial catódico de -20 mV cercano al potencial de circuito abierto (OCP) hasta un potencial anódico de +20 mV cercano a OCP, a una velocidad de barrido de 10 mV/s para estudiar la resistencia a la polarización. La eficiencia de inhibición EI (%) se calculó mediante la ecuación (3) (Mourya, 2014).

$$EI (\%) = \frac{RPL_{inh} - RPL}{RPL_{inh}} \times 100 \quad (3)$$

Dónde: RPL y RPL_{inh} son la resistencia a la polarización lineal en ausencia y presencia del extracto, respectivamente.

Pruebas de Polarización Potenciodinámica

Las mediciones potenciodinámicas de Tafel se iniciaron desde la dirección catódica hasta la anódica, $E = E_{corr} \pm 250$ mV, con una velocidad de barrido de 1.0 mV/s. La eficiencia de inhibición IE (%) para la técnica potenciodinámica se calculó mediante la ecuación (4) (Boumhara et al., 2019). Las mediciones se realizaron después de 24 horas de inmersión. El equipo que se utilizó es un potenciostato-galvanostato (instrumento Gill

ACM) controlado por computadora y los datos se analizaron mediante la interfaz electroquímica del analizador.

$$EI (\%) = \frac{I^{\circ}_{\text{corr}} - I_{\text{corr}}}{I^{\circ}_{\text{corr}}} \times 100 \quad (4)$$

Dónde: I°_{corr} e I_{corr} son las densidades de corriente de corrosión inhibida y no inhibida, respectivamente, determinadas por extrapolación de líneas de Tafel catódicas al potencial de corrosión.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Medición de pérdida de peso

Los valores de las tasas de corrosión, la eficiencia de inhibición (EI) y la cobertura superficial (θ) obtenidos a partir de la medición gravimétrica en H_2SO_4 1 M sin y con diferentes concentraciones del inhibidor se registraron en la Tabla 2, donde se muestra que, con concentraciones de inhibidor gradualmente crecientes, la velocidad de corrosión del acero disminuye gradualmente, es decir, la corrosión del acero es retardada debido a la presencia del EAL, mientras que la eficiencia de inhibición mejora con el aumento de la concentración del inhibidor. El valor máximo de EI (%) de 94.88% se alcanza a 7.5 (% v/v). Además, se observa que la EI de 7.5 y 10 (% v/v) tienen valores cercanos.

Tabla 2.

Velocidad de corrosión del acero después de 24 h de inmersión en 1 M H_2SO_4 a diferentes concentraciones de EAL

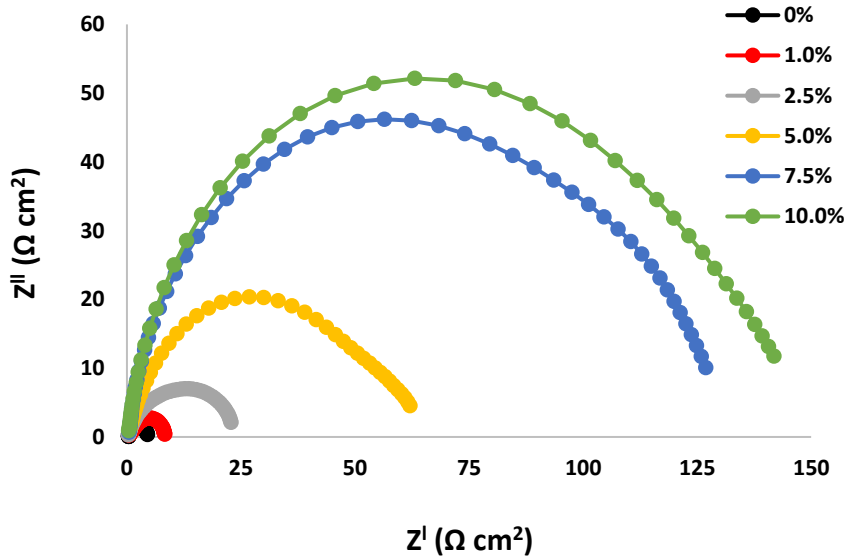
Concentración (%v/v)	0	1	2.5	5	7.5	10
Velocidad de corrosión ($\text{mg}/\text{cm}^2\text{h}$)	8.4349	2.9329	1.6297	0.6174	0.4313	0.4611
EI (%)		65.228	80.678	92.679	94.886	94.533
Cobertura superficial (θ)		0.6522	0.8067	0.9267	0.9488	0.9453

Nota: Elaboración propia

Mediciones de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIE)

En la Figura 3 se muestra el diagrama de Nyquist para los ensayos realizados sin y con inhibidor de EAL y en la Figura 4 un acercamiento de las tres concentraciones más bajas, en las gráficas se puede apreciar una serie de semicírculos deprimidos, lo anterior indica que la corrosión del acero en una solución ácida de H_2SO_4 1 M está controlada principalmente por un proceso de transferencia de carga. También se observa que el EAL modificó la respuesta de impedancia del acero. En ambos diagramas se observa que el tamaño del semicírculo aumenta a medida que aumenta la concentración, lo que indica un incremento de la eficiencia de protección. Este comportamiento es característico de los electrodos sólidos y a menudo se denomina dispersión de frecuencia, atribuyéndose a la rugosidad y otras heterogeneidades de la superficie sólida (Quraishi et al., 2010).

Figura 3. Diagramas de Nyquist de acero en H_2SO_4 1 M a diferentes concentraciones de EAL



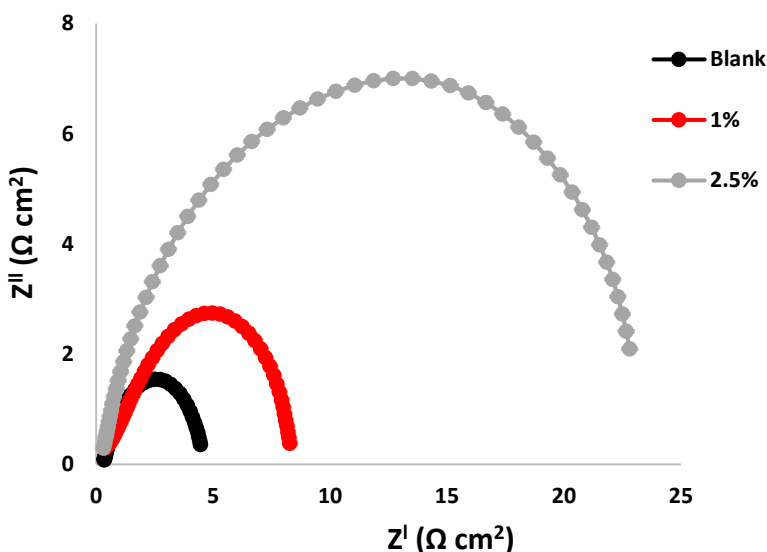
Nota: Elaboración propia

Los datos que se determinaron mediante el ajuste al modelo de circuito eléctrico equivalente que se mostró en la Figura 2 se presentan en la Tabla 3. En este circuito equivalente, R_s es la resistencia de la solución, R_{ct} es la resistencia de transferencia de carga y CPE es un elemento de fase constante. Los resultados muestran que, al aumentar la concentración del inhibidor, los valores de capacitancia efectiva C_{dl} disminuyen y la

eficiencia de inhibición aumenta. La disminución en los valores de C_{dl} puede atribuirse a una disminución en la constante dieléctrica local y/o un aumento en el espesor de la doble capa eléctrica, lo que sugiere que el EAL actúa por adsorción en la interfaz acero /solución (Singh y Quraishi, 2010). Por lo tanto, el cambio en los valores de C_{dl} se atribuye al reemplazo gradual de moléculas de agua por la adsorción de EAL en la superficie del metal, disminuyendo el grado de disolución del metal (Singh et al., 2010).

Figura 4.

Diagramas de Nyquist del acero en H_2SO_4 1M a diferentes concentraciones de EAL, (acercamiento en primer plano de las concentraciones al 1% y al 2,5%).



Nota: Elaboración propia

Los datos que se determinaron mediante el ajuste al modelo de circuito eléctrico equivalente que se mostró en la Figura 2 se presentan en la Tabla 3. En este circuito equivalente, R_s es la resistencia de la solución, R_{ct} es la resistencia de transferencia de carga y CPE es un elemento de fase constante. Los resultados muestran que, al aumentar la concentración del inhibidor, los valores de capacitancia efectiva C_{dl} disminuyen y la eficiencia de inhibición aumenta. La disminución en los valores de C_{dl} puede atribuirse a una disminución en la constante dieléctrica local y/o un aumento en el espesor de la doble capa eléctrica, lo que sugiere que el EAL actúa por adsorción en la interfaz acero /solución (Singh y Quraishi, 2010).

Por lo tanto, el cambio en los valores de Cdl se atribuye al reemplazo gradual de moléculas de agua por la adsorción de EAL en la superficie del metal, disminuyendo el grado de disolución del metal (Singh et al., 2010).

Tabla 3.

Datos obtenidos del ajuste con el circuito eléctrico después de 24 h de inmersión en 1 M H₂SO₄ a diferentes concentraciones de EAL

Concentración (%v/v)	R _s (Ω* cm ²)	R _{ct} (Ω*cm ²)	C _{dl} (μF/cm ²)	N	IE (%)
0	0.33	4.4	35.2	0.75	0
1.0	0.53	8.23	9.39	0.72	46.56
2.5	0.59	24.64	1.16	0.66	82.13
5.0	0.53	61.23	0.32	0.73	92.81
7.5	0.60	128.5	0.51	0.79	96.57
10.0	0.57	141.54	0.42	0.80	96.88

Nota: Elaboración propia

Mediciones de Resistencia a la Polarización Lineal (RPL)

Los resultados obtenidos mediante mediciones de RPL (Figura 5) y la eficiencia resultante calculada según la ecuación (3) se muestran en la Tabla 4. Se observa que, al aumentar la concentración de inhibidor, el valor de resistencia a la polarización lineal (RPL) aumenta y, en consecuencia, la densidad de corriente de corrosión disminuye, lo que indica que la eficiencia de EAL aumenta al aumentar la concentración de inhibidor.

Polarización Potenciodinámica (Curvas de Polarización)

Se realizaron mediciones de polarización para comprender la cinética de las reacciones anódicas y catódicas. Las curvas de polarización del acero a diversas concentraciones de EAL en soluciones ácidas de H₂SO₄ 1 M se muestran en la (Figura 6). Los parámetros electroquímicos derivados de las curvas se presentan en la (Tabla 5). A partir de estos resultados de polarización, se observa que los valores de I_{corr} disminuyeron en presencia de inhibidor. Mientras que los valores de E_{corr} se vuelven más negativos al aumentar la concentración de inhibidor, lo que refleja su naturaleza más catódica (Kumar et al., 2011). Como se puede observar en la (Figura 7), la adición de EAL a soluciones ácidas desplaza las ramas anódica y catódica del diagrama de Tafel a valores más bajos de densidad de corriente en todas las concentraciones, pero el ánodo está más polarizado. El EAL inhibe tanto la evolución de hidrógeno como la disolución de metales, lo que

sugiere que actúa como un inhibidor de tipo mixto (Lebrini et al., 2007). Los datos de polarización también confirman los resultados gravimétricos.

Tabla 4.

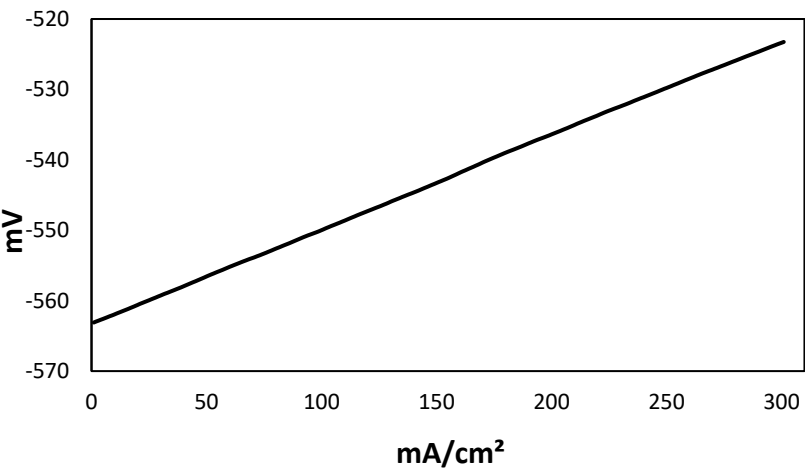
Resultados de RPL para diferentes concentraciones de EAL a las 24 horas de inmersión en H_2SO_4 1M

Concentración (%v/v)	RPL (Ωcm^2)	EI (%)
0	4.62	0
1.0	8.19	43.58
2.5	25.77	82.07
5.0	50.96	90.93
7.5	105.49	95.62
10.0	124.48	96.28

Nota: Elaboración propia

Figura 5.

Gráfico de resistencia a la polarización del acero en H_2SO_4 con 5% de EAL añadido después de 24 h de inmersión



Nota: Elaboración propia

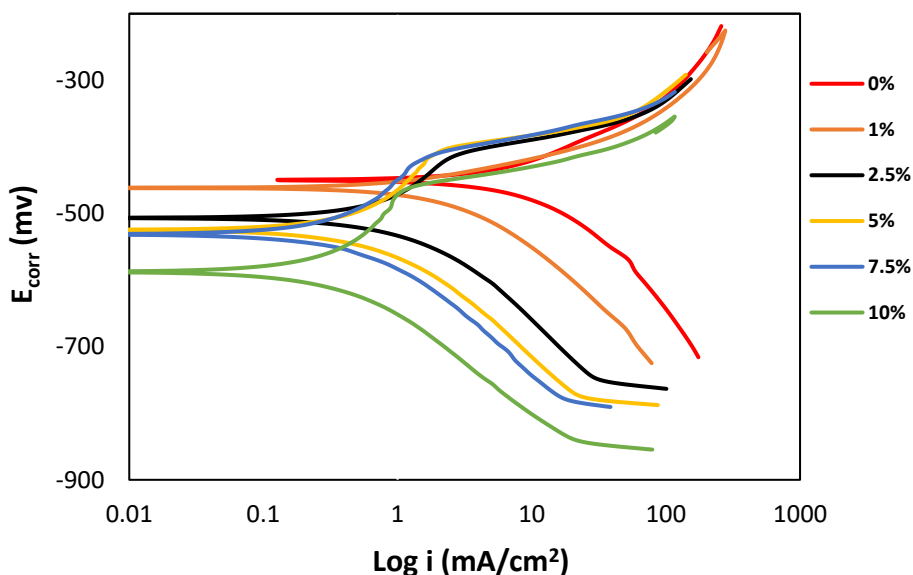
Polarización Potenciodinámica (Curvas de Polarización)

Se realizaron mediciones de polarización para comprender la cinética de las reacciones anódicas y catódicas. Las curvas de polarización del acero a

diversas concentraciones de EAL en soluciones ácidas de H_2SO_4 1 M se muestran en la (Figura 6). Los parámetros electroquímicos derivados de las curvas se presentan en la (Tabla 5). A partir de estos resultados de polarización, se observa que los valores de I_{corr} disminuyeron en presencia de inhibidor. Mientras que los valores de E_{corr} se vuelven más negativos al aumentar la concentración de inhibidor, lo que refleja su naturaleza más catódica (Kumar et al., 2011). Como se puede observar en la (Figura 7), la adición de EAL a soluciones ácidas desplaza las ramas anódica y catódica del diagrama de Tafel a valores más bajos de densidad de corriente en todas las concentraciones, pero el ánodo está más polarizado. El EAL inhibe tanto la evolución de hidrógeno como la disolución de metales, lo que sugiere que actúa como un inhibidor de tipo mixto (Lebrini et al., 2007). Los datos de polarización también confirman los resultados gravimétricos.

Figura 6.

Curvas de polarización con y sin de diferentes concentraciones de EAL en H_2SO_4 1M a las 24 h



Nota: Elaboración propia

Isoterma de adsorción

Las isotermas de adsorción se utilizan habitualmente para describir el proceso de adsorción. El mecanismo de inhibición de la corrosión puede

explicarse basándose en el comportamiento de adsorción. Para obtener más información sobre el tipo de interacción entre las moléculas inhibidoras y la superficie del acero, se aplicaron las isotermas de adsorción más utilizadas para ajustar la cobertura superficial (θ). La isoterma de adsorción de Langmuir fue la que mejor se ajustó (Figura 7) y puede describirse mediante la ecuación (5) (Haldhar et al., 2018b). La asociación de la isoterma de adsorción de Langmuir indica que la inhibición de la corrosión se debe a la formación de una película quimisorbida en la superficie metálica.

Tabla 5.

Parámetros de polarización potenciodinámica para la corrosión del acero en H_2SO_4 1 M en ausencia y presencia de diferentes concentraciones de EAL a 24 h de inmersión

Concentración (%v/v)	E_{corr} (mV)	b_c (mV)	b_a (mV)	I_{corr} (mA*cm ²)	IE (%)
0	-450	238.58	143.57	34.83	0
1.0	-475	181.07	108.10	25.08	27.99
2.5	-506	187.80	172.81	24.40	29.94
5.0	-525	177.55	199.30	19.05	45.30
7.5	-531	173.88	150.04	18.32	47.40
10.0	-588	155.48	135.26	11.38	67.32

Nota: Elaboración propia

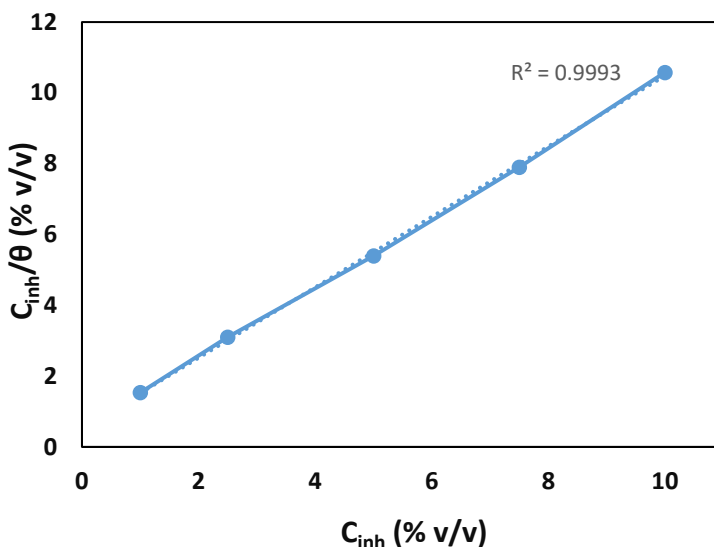
Isoterma de adsorción

Las isotermas de adsorción se utilizan habitualmente para describir el proceso de adsorción. El mecanismo de inhibición de la corrosión puede explicarse basándose en el comportamiento de adsorción. Para obtener más información sobre el tipo de interacción entre las moléculas inhibidoras y la superficie del acero, se aplicaron las isotermas de adsorción más utilizadas para ajustar la cobertura superficial (θ). La isoterma de adsorción de Langmuir fue la que mejor se ajustó (Figura 7) y puede describirse mediante la ecuación (5) (Haldhar et al., 2018b). La asociación de la isoterma de adsorción de Langmuir indica que la inhibición de la corrosión se debe a la formación de una película quimisorbida en la superficie metálica.

$$\frac{Cinh}{\theta} = \frac{1}{K} + Cinh \quad (5)$$

Figura 7.

Diagrama de isoterma de adsorción de Langmuir para acero en H_2SO_4 1 M a diferentes concentraciones de EAL



Nota: Elaboración propia

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran que el extracto de *A. ludoviciana* posee un gran potencial como inhibidor verde de la corrosión del acero en medio ácido (H_2SO_4 1 M). Este hallazgo no solo confirma la eficacia del extracto para disminuir la velocidad de corrosión, lo que se observa tanto en las mediciones gravimétricas como en los análisis electroquímicos, sino que también refleja la capacidad de los compuestos naturales como aliados en la protección de los materiales metálicos.

Al incrementarse la concentración del extracto, la disminución de la velocidad de corrosión fue evidente, alcanzando una eficiencia superior al 90 % con una adición del 5 % v/v, lo cual es comparable a los inhibidores sintéticos comerciales. Este comportamiento sugiere la formación de una capa protectora estable sobre la superficie del acero, en correlación con la isoterma de adsorción de Langmuir, que indica un proceso de quimisorción.

Más allá de los resultados técnicos, el estudio muestra el potencial de los recursos forestales no maderables como la *A. ludoviciana*, una especie que crece de manera silvestre y cuya utilización responsable puede aportar

soluciones sostenibles en campos tradicionalmente dominados por los productos químicos sintéticos. Integrar extractos vegetales en procesos industriales abre la posibilidad de reducir el impacto ambiental asociado al uso de inhibidores tóxicos.

En conjunto, estos resultados no solo confirman la eficacia del extracto vegetal como inhibidor mixto, con predominio anódico, sino que también respaldan la importancia de explorar los recursos naturales con un enfoque sustentable y multidisciplinario, donde la investigación científica se alinee con la preservación del entorno y el aprovechamiento responsable de la biodiversidad.

LITERATURA CITADA

- Abdel-Gaber, A. M., Abd-El-Nabey, B. A., Sidahmed, I. M., El-Zayady, A. M., & Saadawy, M. (2006). Inhibitive action of some plant extracts on the corrosion of steel in acidic media. *Corrosion science*, 48(9), 2765-2779.
- ASTM, G. (1990). 31, Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals. *American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA*.
- Barbu, C. A., Fierascu, I., Semenescu, A., & Cotrut, C. M. (2025). Critical Review Regarding the Application of Plant Extracts as Eco-Friendly Corrosion Inhibitors—A Sustainable Interdisciplinary Approach. *Molecules*, 30(18), 3722.
- Benarioua, M., Mihi, A., Bouzeghaia, N., & Naoun, M. (2019). Mild steel corrosion inhibition by Parsley (*Petroselinum Sativum*) extract in acidic media. *Egyptian Journal of Petroleum*, 28(2), 155-159.
- Berkes, F. (2017). Environmental governance for the anthropocene? Social-ecological systems, resilience, and collaborative learning. *Sustainability*, 9(7), 1232.
- Boumhara, K., Harhar, H., Tabyaoui, M., Bellaouchou, A., Guenbour, A., & Zarrouk, A. (2019). Corrosion inhibition of mild steel in 0.5 M H₂SO₄ solution by Artemisia herba-alba oil. *Journal of Bio-and Tribo-Corrosion*, 5(1), 8.
- Chevalier, M., Lebrini, M., Robert, F., Sutour, S., Tomi, F., Jama, C., ... & Roos, C. (2019). Investigation of corrosion inhibition efficiency of Amazonian tree alkaloids extract for C38 steel in 1M hydrochloric media. *International Journal of Electrochemical Science*, 14(2), 1208-1223.
- Clark, J. H., Luque, R., & Matharu, A. S. (2012). Green chemistry, biofuels, and biorefinery. *Annual review of chemical and biomolecular engineering*, 3(1), 183-207.

- Daily, G. C., Polasky, S., Goldstein, J., Kareiva, P. M., Mooney, H. A., Pejchar, L., ... & Shallenberger, R. (2009). Ecosystem services in decision making: time to deliver. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7(1), 21-28.
- Haldhar, R., Prasad, D., & Saxena, A. (2018a). Myristica fragrans extract as an eco-friendly corrosion inhibitor for mild steel in 0.5 M H₂SO₄ solution. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(2), 2290-2301.
- Haldhar, R., Prasad, D., & Saxena, A. (2018b). Armoracia rusticana as sustainable and eco-friendly corrosion inhibitor for mild steel in 0.5 M sulphuric acid: Experimental and theoretical investigations. *Journal of environmental chemical engineering*, 6(4), 5230-5238.
- Hassan, H. H., Abdelghani, E., & Amin, M. A. (2007). Inhibition of mild steel corrosion in hydrochloric acid solution by triazole derivatives: Part I. Polarization and EIS studies. *Electrochimica Acta*, 52(22), 6359-6366.
- Kadhim, A., Al-Amiery, A. A., Alazawi, R., Al-Ghezi, M. K. S., & Abass, R. H. (2021). Corrosion inhibitors. A review. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, 10(1), 54-67.
- Karki, N., Neupane, S., Gupta, D. K., & Yadav, A. P. (2023). Electrochemical study on the effect of polar and non-polar extract of Artemisia vulgaris on the corrosion inhibition of mild steel in an acidic medium. *RSC advances*, 13(11), 7603-7613.
- Kumar, K. V., Pillai, M. S. N., & Thusnavis, G. R. (2011). Seed extract of Psidium guajava as ecofriendly corrosion inhibitor for carbon steel in hydrochloric acid medium. *Journal of Materials Science & Technology*, 27(12), 1143-1149.
- Lebrini, M., Lagrenée, M., Traisnel, M., Gengembre, L., Vezin, H., & Bentiss, F. (2007). Enhanced corrosion resistance of mild steel in normal sulfuric acid medium by 2, 5-bis (n-thienyl)-1, 3, 4-thiadiazoles: electrochemical, X-ray photoelectron spectroscopy and theoretical studies. *Applied Surface Science*, 253(23), 9267-9276.
- Li, X., Deng, S., Fu, H., & Xie, X. (2014). Synergistic inhibition effects of bamboo leaf extract/major components and iodide ion on the corrosion of steel in H₃PO₄ solution. *Corrosion Science*, 78, 29-42.
- Mourya, P., Banerjee, S., & Singh, M. M. (2014). Corrosion inhibition of mild steel in acidic solution by Tagetes erecta (Marigold flower) extract as a green inhibitor. *Corrosion Science*, 85, 352-363.

- Nnanna, L. A., Owate, I. O., Nwadiuko, O. C., Ekekwe, N. D., & Oji, W. J. (2013). Adsorption and corrosion inhibition of *Gnetum africana* leaves extract on carbon steel. *Int. J. Mater. Chem*, 3(1), 10-16.
- Okafor, P. C., Ebiekpe, V. E., Azike, C. F., Egbung, G. E., Brisibe, E. A., & Ebenso, E. E. (2012). Inhibitory action of *Artemisia annua* extracts and artemisinin on the corrosion of mild steel in H₂SO₄ solution. *International Journal of Corrosion*, 2012(1), 768729.
- Onukwuli, O. D., Anadebe, V. C., Nnaji, P. C., Okafor, N. A., Abeng, F. E., Chidiebere, M. A., ... & Guo, L. (2021). Effect of pigeon pea seed (isoflavone) molecules on corrosion inhibition of mild steel in oilfield descaling solution: electro-kinetic, DFT modeling and optimization studies. *Journal of the Iranian Chemical Society*, 18(11), 2983-3005.
- Pomerantsev, A. L. (2005). Progress in chemometrics research. Nova Publishers.
- Quraishi, M. A., Singh, A., Singh, V. K., Yadav, D. K., & Singh, A. K. (2010). Green approach to corrosion inhibition of mild steel in hydrochloric acid and sulphuric acid solutions by the extract of *Murraya koenigii* leaves. *Materials chemistry and Physics*, 122(1), 114-122.
- Raja, P. B., & Sethuraman, M. G. (2008). Natural products as corrosion inhibitor for metals in corrosive media—a review. *Materials letters*, 62(1), 113-116.
- Rzedowski Rotter, J. (1985). Flora fanerogámica del Valle de México.
- Saxena, A., Prasad, D., & Haldhar, R. (2018). Investigation of corrosion inhibition effect and adsorption activities of *Cuscuta reflexa* extract for mild steel in 0.5 M H₂SO₄. *Bioelectrochemistry*, 124, 156-164.
- Sheydaei, M. (2024). The use of plant extracts as green corrosion inhibitors: A review. *Surfaces*, 7(2), 380-403.
- Singh, A. K., & Quraishi, M. A. (2010). Effect of Cefazolin on the corrosion of mild steel in HCl solution. *Corrosion Science*, 52(1), 152-160.
- Singh, A., Singh, V. K., & Quraishi, M. A. (2010). Effect of fruit extracts of some environmentally benign green corrosion inhibitors on corrosion of mild steel in hydrochloric acid solution. *Journal of materials and environmental science*, 1(3), 162-174.
- Suarez, M. A. G. (2022). Identificación de sabores in silico de compuestos presentes en *Artemisia ludoviciana* de acuerdo con la medicina china.
- Tan, B., Xiang, B., Zhang, S., Qiang, Y., Xu, L., Chen, S., & He, J. (2021). Papaya leaves extract as a novel eco-friendly corrosion inhibitor

- for Cu in H₂SO₄ medium. *Journal of colloid and interface science*, 582, 918-931.
- Tehrani, M. E. H. N., Ghahremani, P., Ramezanzadeh, M., Bahlakeh, G., & Ramezanzadeh, B. (2021). Theoretical and experimental assessment of a green corrosion inhibitor extracted from *Malva sylvestris*. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(3), 105256.
- Torralba, M., Fagerholm, N., Hartel, T., Moreno, G., & Plieninger, T. (2018). A social-ecological analysis of ecosystem services supply and trade-offs in European wood-pastures. *Science Advances*, 4(5), eaar2176.
- Verma, C., Ebenso, E. E., Quraishi, M. A., & Hussain, C. M. (2021). Recent developments in sustainable corrosion inhibitors: design, performance and industrial scale applications. *Materials Advances*, 2(12), 3806-3850.
- Zaferani, S. H., Sharifi, M., Zaarei, D., & Shishesaz, M. R. (2013). Application of eco-friendly products as corrosion inhibitors for metals in acid pickling processes—A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 1(4), 652-657.
- Zhao, W., Li, F., Lv, X., Chang, J., Shen, S., Dai, P., ... & Cao, Z. (2023). Research progress of organic corrosion inhibitors in metal corrosion protection. *Crystals*, 13(9), 1329.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero proporcionado por la Dirección General de Investigación Posgrado, de la Universidad Autónoma de Sinaloa, a través del proyecto PROFAPI 2015/196, cuyo título es: “Evaluación de extractos naturales de *Artemisia ludoviciana* (Estafiate) y *Pithecellobium dulce* (Guamúchil) como inhibidores verdes de la corrosión en metales”

SÍNTESIS CURRICULAR

M.C. Haniel Nephtalí Flores-Cortez

Ingeniero Industrial con especialidad en Calidad y Productividad por el Instituto Tecnológico de Los Mochis. Maestro en Ciencias de la Ingeniería por la Universidad Autónoma de Sinaloa y Doctorando en Ciencias de la Ingeniería en la misma, especializado en Deterioro de Materiales. Miembro de la Asociación Mexicana de Electroquímica (desde 2017) y de la Sociedad Mexicana de Materiales A.C. (desde 2019). Docente en el programa de Ingeniería en Sistemas de Calidad en la Universidad

Autónoma Indígena de México, Unidad Los Mochis. Encargado de Servicio Social y Estadía Profesional (2021) y actualmente es jefe del Departamento de Evaluación y Acreditación de Planes y Programas Educativos. Correo electrónico: haniel.florescortez@hotmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5879-1958>

Dra. Rosa Elba Núñez-Jaquez

Ingeniero Industrial Químico por el Instituto Tecnológico de Chihuahua, con Maestría y Doctorado en Ciencia de Materiales por el CIMAV. Profesora investigadora de tiempo completo en la Facultad de Ingeniería Mochis de la Universidad Autónoma de Sinaloa, donde imparte docencia en licenciatura y posgrado. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores e Innovadores (SNII) Nivel 1 del SECIHTI y del SSIT-CONFIE. Perfil Deseable PROMEP (SEP), miembro activo de la Sociedad Mexicana de Electroquímica. Ha dirigido más de 30 tesis y participado en 10 proyectos de investigación, con publicaciones en revistas indexadas JCR y más de 80 ponencias en congresos nacionales e internacionales. Correo electrónico: ronunez@uas.edu.mx. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2330-6187>

Dr. Carlos Paulino Barrios-Durstewitz

Profesor Investigador Titular “C” en la Facultad de Ingeniería Mochis de la Universidad Autónoma de Sinaloa y miembro del Comité Académico del Posgrado en Ciencias de la Ingeniería. Investigador Nacional Nivel I en el Sistema Nacional de Investigadores e Innovadores (SNII-SECIHTI) e Investigador Honorífico del SSIT-CONFIE. Perfil Deseable PROMEP (SEP). Docente en los programas de Licenciatura y Posgrado. Responsable de 10 proyectos PROFAPI, PROMEP y CONACYT, miembro activo de la Sociedad Mexicana de Electroquímica y ALCONPAT-México. Ha participado en más de 60 congresos nacionales e internacionales y publicados artículos sobre corrosión y ciencia de materiales. Correo electrónico: durstewitz@uas.edu.mx. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5742-9559>

Dr. Adrián Bórquez-Mendivil

Doctor en Ciencias de la Ingeniería por la Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS), donde también obtuvo los grados de Ingeniero Civil y Maestro en Ciencias de la Ingeniería. Es colaborador del Cuerpo Académico Consolidado “Ciencia de Materiales e Ingeniería Civil” (UAS-CA-221). Ha contribuido con publicaciones en revistas indexadas de alto impacto, la dirección de tesis de licenciatura y la formación de recursos

humanos. Participa activamente en congresos nacionales e internacionales y se desempeña como revisor en revistas científicas internacionales. Cuenta con la distinción de Investigador otorgada por el Sistema Sinaloense de Investigadores y Tecnólogos. Correo electrónico: adrian.borquez.fim@uas.edu.mx. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4765-0791>.

Dr. Juan Pablo Flores-De los Ríos

Ingeniero en Ciencia de Materiales por la Universidad Juárez del Estado de Durango, con Maestría y Doctorado en Ciencia de Materiales por el Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV). Posee 11 años de experiencia en los sectores minero e industrial, y 14 años de trayectoria docente. Ha participado en proyectos de investigación financiados y en múltiples congresos nacionales e internacionales, con más de 40 publicaciones en revistas de alto impacto. Ha dirigido 18 tesis de licenciatura, una de maestría y una de doctorado, y actualmente supervisa tres tesis doctorales, una de licenciatura y un proyecto posdoctoral. Se desempeña como profesor de tiempo completo en el Instituto Tecnológico de Chihuahua. Correo electrónico: jpdelosrios@uach.mx. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4691-3118>.