

DOI: <https://doi.org/10.63618/omd/revinvlid/v2/n4/43>

Corrosión en infraestructuras petroleras y materiales de protección avanzada.

Corrosion in oil infrastructure and advanced protective materials.

Ruiz-Sánchez, Clara Isabel ¹.

¹ Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE; Ecuador; <https://orcid.org/0000-0003-2864-5137>;
cirui4@espe.edu.ec.

Cita: Ruiz-Sánchez, C. I. (2025). Corrosión en infraestructuras petroleras y materiales de protección avanzada. *Revista De Investigación Y Liderazgo*, 2(4), 16-31. <https://doi.org/10.63618/omd/revinvlid/v2/n4/43>

Resumen

La corrosión compromete la integridad, continuidad operativa y sostenibilidad económica de ductos, tanques y equipos estáticos petroleros expuestos a condiciones químicas, térmicas, biológicas y ambientales variables. El estudio tuvo como objetivo analizar los mecanismos de deterioro y el desempeño técnico-económico de materiales de protección avanzada aplicables a la industria petrolera ecuatoriana y latinoamericana. Se desarrolló una investigación cualitativa, documental, no experimental, longitudinal y descriptiva, basada en publicaciones e informes del periodo 2021–2025, examinados mediante análisis de contenido y síntesis temática. Los resultados mostraron que la disminución de la corrosión uniforme pudo coexistir con el incremento del daño localizado; además, los recubrimientos nanocompuestos, autorreparables y superhidrofóbicos presentaron mejoras diferenciadas en impedancia, durabilidad y eficiencia anticorrosiva. La envoltura compuesta redujo entre 30 % y 78 % los costos relativos de reparación, aunque su conveniencia ambiental dependió del escenario evaluado. Estos hallazgos indican que ninguna tecnología resultó universalmente superior, debido a la heterogeneidad de sustratos, condiciones de ensayo y mecanismos de protección. Se concluyó que la selección anticorrosiva debe integrar criticidad del activo, ambiente de exposición, desempeño multifuncional, mantenimiento, costo del ciclo de vida e impacto ambiental.

Palabras clave: corrosión petrolera; infraestructura energética; recubrimientos avanzados; integridad de activos; protección anticorrosiva.

Abstract

Corrosion compromises the integrity, operational continuity, and economic sustainability of pipelines, tanks, and static oil equipment exposed to variable chemical, thermal, biological, and environmental conditions. The study aimed to analyze the deterioration mechanisms and the technical-economic performance of advanced protective materials applicable to the Ecuadorian and Latin American oil industry. A qualitative, documentary, non-experimental, longitudinal, and descriptive research was developed, based on publications and reports from the period 2021–2025, examined thru content analysis and thematic synthesis. The results showed that the reduction of uniform corrosion could coexist with the increase of localized damage; moreover, the nanocomposite, self-healing, and superhydrophobic coatings presented differentiated improvements in impedance, durability, and anticorrosive efficiency. The composite wrap reduced relative repair costs by between 30% and 78%, although its environmental suitability depended on the evaluated scenario. These findings indicate that no technology proved universally superior, due to the heterogeneity of substrates, testing conditions, and protection mechanisms. It was concluded that the selection of anti-corrosive measures must integrate asset criticality, exposure environment, multifunctional performance, maintenance, life cycle cost, and environmental impact.

Keywords: oil corrosion; energy infrastructure; advanced coatings; asset integrity; anti-corrosive protection.

1. Introducción

La corrosión constituye una amenaza estratégica para la continuidad de las infraestructuras petroleras de Ecuador y de otros sistemas energéticos latinoamericanos, debido a que compromete activos sometidos a condiciones químicas, térmicas, mecánicas y ambientales variables. Las estadísticas ecuatorianas de 2024 registran exportaciones de 126,31 millones de barriles de crudo, valoradas en USD 8.646,54 millones, con un crecimiento interanual del 9,8 % en volumen, lo que evidencia la relevancia económica de preservar la integridad de la cadena petrolera (Banco Central del Ecuador, 2025). Esta cadena incluye el Sistema de Oleoducto Transecuatoriano, con 497,7 km y capacidad operativa de 360.000 barriles diarios, y el Oleoducto de Crudos Pesados, cuya capacidad alcanza 450.000 barriles diarios. A ello se suman las refinerías de Esmeraldas, La Libertad y Shushufindi, que concentran una capacidad conjunta de 175.000 barriles por día (EP Petroecuador, 2022). Dentro de este entramado, el análisis se concentra en las superficies metálicas y los sistemas de protección de ductos, tanques de almacenamiento y equipos estáticos vinculados con el transporte, refinación y almacenamiento de hidrocarburos. La magnitud productiva y financiera de estos activos convierte el control de la corrosión en un componente inseparable de la seguridad energética y de la sostenibilidad industrial del país.

La exposición prolongada de los aceros al agua de formación, dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, sales disueltas, oxígeno, microorganismos y esfuerzos mecánicos favorece procesos de corrosión uniforme, picadura, erosión-corrosión, fragilización por hidrógeno y corrosión microbiológicamente influenciada (Solovyeva et al., 2023; Shehata & El-Shamy, 2023). En el exterior de los activos, la humedad tropical, los suelos corrosivos, la salinidad costera, la radiación ultravioleta y el desprendimiento de recubrimientos amplían las áreas susceptibles a ataques localizados, especialmente cuando la protección catódica presenta discontinuidades (Farh et al., 2023). El impacto económico trasciende el reemplazo de componentes, pues la corrosión representa más de USD 2,5 billones anuales, equivalentes aproximadamente al 3,4 % del producto interno bruto mundial (Association for Materials Protection and Performance [AMPP], 2023). La aplicación sistemática de prácticas de control permite reducir entre 15 % y 35 % de esos costos, es decir, entre USD 375.000 millones y USD 875.000 millones cada año, según estimaciones sectoriales de alcance global (AMPP, 2023). Cuando el deterioro no se detecta oportunamente, la pérdida de espesor y la formación de grietas incrementan la probabilidad de fugas, incendios, paradas no programadas, contaminación de suelos y cuerpos de agua y exposición de trabajadores y comunidades a sustancias peligrosas. Estas consecuencias también erosionan la confianza institucional, elevan los costos de remediación y disminuyen la disponibilidad de combustibles y materias primas para otros sectores productivos.

La necesidad de superar las limitaciones de los esquemas convencionales impulsa el desarrollo de materiales que combinan funciones de barrera, inhibición activa, autorreparación y respuesta frente a estímulos ambientales. Los recubrimientos epóxicos continúan siendo una base industrial relevante, pero su desempeño mejora mediante nanopartículas de óxidos metálicos, sílice, nanoclay, derivados de grafeno y estructuras metal-orgánicas capaces de reducir la permeabilidad y prolongar las trayectorias de difusión de agua e iones (Thomas et al., 2024). A esta estrategia se incorporan sistemas autorreparables con microcápsulas o nanocontenedores que

liberan agentes formadores de película o inhibidores cuando una grieta altera el pH, la humedad o la estructura del recubrimiento (Sanyal et al., 2024). La literatura reporta que los microcontenedores comprendidos aproximadamente entre 50 y 200 μm ofrecen capacidad suficiente para almacenar agentes reparadores y responder al daño mecánico, aunque su tamaño óptimo depende del espesor y de la formulación de la matriz (Kartsonakis et al., 2024). También adquieren relevancia las superficies superhidrofóbicas, los recubrimientos híbridos sol-gel y las formulaciones de bajo contenido de compuestos orgánicos volátiles, debido a que integran resistencia química con menores cargas ambientales. La selección industrial, sin embargo, requiere comparar estas tecnologías con la protección catódica, los inhibidores, la limpieza interna y los recubrimientos tradicionales, porque ninguna alternativa ofrece el mismo rendimiento frente a todas las combinaciones de temperatura, presión, salinidad y esfuerzo.

Aunque los avances experimentales muestran mejoras sustanciales en resistencia electroquímica, adhesión y capacidad de reparación, la evidencia permanece fragmentada entre sustratos, formulaciones y protocolos de ensayo difícilmente comparables. Las revisiones recientes señalan que numerosos recubrimientos multifuncionales todavía se encuentran en fases iniciales de desarrollo y que su rendimiento en laboratorio no garantiza estabilidad frente a ciclos reales de operación, abrasión, envejecimiento ultravioleta o defectos repetitivos (Thomas et al., 2024; Kartsonakis et al., 2024). Las diferencias en preparación superficial, concentración de nanomateriales, espesor, temperatura, tiempo de inmersión y composición del electrolito generan resultados inconsistentes e impiden establecer relaciones universales entre formulación y vida útil. Esta limitación resulta especialmente importante en Ecuador, donde el SOTE opera desde 1972 y supera cinco décadas de servicio, mientras la Refinería Esmeraldas funciona desde 1977 y se aproxima a medio siglo de operación industrial (EP Petroecuador, 2022). Las revisiones globales consultadas tampoco aportan validaciones específicas que relacionen simultáneamente ambientes amazónicos, andinos y costeros con desempeño anticorrosivo, compatibilidad con protección catódica y costo del ciclo de vida. Por ello, la brecha no consiste únicamente en producir nuevos materiales, sino en determinar cuáles mantienen su desempeño técnico y económico bajo las condiciones heterogéneas de activos petroleros envejecidos y estratégicos (Egbuhuzor et al., 2025; Kumari & Lavanya, 2024).

La posibilidad de cerrar esta brecha se sustenta en la disponibilidad de estadísticas oficiales, especificaciones técnicas, literatura científica reciente y registros agregados de inspección y mantenimiento que permiten examinar el fenómeno sin intervenir directamente en procesos críticos. El estudio considera información correspondiente al periodo 2021–2025 y puede complementarse con datos operativos anonimizados, evitando recopilar información personal o divulgar detalles sensibles para la seguridad de las instalaciones (Banco Central del Ecuador, 2025; EP Petroecuador, 2022). Sobre esta base, el objetivo general consiste en analizar los mecanismos de corrosión y el desempeño de materiales de protección avanzada aplicables a ductos, tanques y equipos estáticos de la industria petrolera ecuatoriana. Para alcanzar dicho propósito, el primer objetivo específico determina la relación entre variables ambientales y operativas (temperatura, salinidad, humedad, presencia de CO_2 y H_2S y condición superficial) y las formas predominantes de deterioro. El segundo compara tres familias tecnológicas (recubrimientos nanocompuestos, sistemas autorreparables y

recubrimientos híbridos o superhidrofóbicos) mediante cuatro criterios: resistencia electroquímica, adhesión, durabilidad y compatibilidad operativa. El tercero estima su conveniencia técnico-económica mediante costos de aplicación, mantenimiento, extensión potencial de la vida útil y reducción esperada del riesgo de falla, sin atribuir causalidad donde los datos disponibles solo permiten asociaciones comparativas (Farh et al., 2023; Kumari & Lavanya, 2024).

El valor original del trabajo reside en integrar, dentro de un mismo marco de evaluación, tres clases de activos petroleros, tres familias de protección avanzada y cuatro dimensiones de desempeño técnico y económico. Esta articulación supera los análisis centrados exclusivamente en eficiencia electroquímica, porque incorpora compatibilidad con las condiciones operativas, mantenibilidad, impacto ambiental y costo durante el ciclo de vida (Farh et al., 2023; Thomas et al., 2024). En el plano académico, la investigación organiza variables que suelen examinarse por separado y genera una base contextualizada para contrastar la respuesta de los materiales en ambientes tropicales, salinos y químicamente agresivos. En el plano práctico, sus resultados permiten jerarquizar alternativas de protección según criticidad, exposición y antigüedad del activo, en lugar de aplicar una solución uniforme a instalaciones con mecanismos de deterioro diferentes. Esta orientación puede contribuir a capturar parte del ahorro potencial de 15 % a 35 % asociado con una gestión sistemática de la corrosión, aunque su magnitud efectiva depende de la calidad de los datos, la aplicación del recubrimiento y la disciplina de mantenimiento (AMPP, 2023). La contribución esperada, por tanto, conecta el desarrollo de materiales inteligentes con una necesidad concreta de la industria ecuatoriana: extender la vida útil de infraestructura estratégica sin trasladar los costos del deterioro a la economía, al ambiente ni a las comunidades.

2. Materiales y Métodos

La investigación se desarrolló desde una perspectiva cualitativa, orientada a interpretar cómo la literatura técnica y científica caracterizó los mecanismos de corrosión y las respuestas de protección aplicables a infraestructuras petroleras. El material empírico estuvo constituido por documentos, por lo que se priorizó el significado atribuido a las condiciones operativas, los modos de deterioro, las propiedades de los materiales y las limitaciones de cada tecnología. Esta elección permitió examinar relaciones conceptuales entre corrosión interna y externa, integridad de activos y desempeño de recubrimientos avanzados sin reducir el fenómeno a una agregación exclusivamente numérica. La interpretación se mantuvo vinculada con los objetivos de analizar los mecanismos de degradación, determinar sus factores asociados y comparar alternativas de protección. La codificación de contenidos se apoyó en procedimientos cualitativos sistemáticos que facilitaron organizar textos heterogéneos mediante categorías y temas verificables (Braun & Clarke, 2021; Kuckartz & Rädiker, 2023). Así, el estudio conservó una orientación aplicada a la ingeniería de materiales y a la gestión de activos petroleros.

La coherencia entre esa finalidad interpretativa y la ausencia de intervención condujo a un diseño no experimental, longitudinal y documental. No se manipularon temperaturas, presiones, composiciones químicas, espesores ni formulaciones de recubrimiento, sino que se analizaron resultados previamente publicados y registros institucionales

disponibles. La dimensión longitudinal se operacionalizó mediante la comparación de documentos correspondientes al periodo 2021–2025, con el propósito de reconocer cambios en los mecanismos estudiados, las técnicas de diagnóstico y los materiales de protección propuestos. El razonamiento deductivo permitió establecer categorías iniciales desde los objetivos y la teoría de corrosión, mientras que el procedimiento inductivo posibilitó incorporar patrones emergentes no previstos. El método analítico descompuso la evidencia según tipo de activo, ambiente corrosivo, material, mecanismo de daño y estrategia de mitigación. El alcance permaneció descriptivo, por lo que se caracterizaron tendencias y diferencias documentadas sin atribuir causalidad ni formular generalizaciones estadísticas para toda la industria latinoamericana (Snyder, 2019; Kuckartz & Rädiker, 2023).

El contexto documental comprendió la industria petrolera ecuatoriana y latinoamericana, complementada con evidencia internacional transferible a ductos, tanques, tuberías de proceso, equipos estáticos y superficies de acero expuestas a medios agresivos. La unidad de análisis estuvo integrada por artículos revisados por pares, revisiones técnicas, informes institucionales y documentos oficiales relacionados con producción, transporte, refinación, corrosión y materiales protectores. La búsqueda se efectuó en Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, SciELO y Google Scholar, junto con los repositorios del Banco Central del Ecuador y EP Petroecuador. Se combinaron los términos “corrosión”, “infraestructura petrolera”, “oil and gas pipeline”, “storage tank”, “CO₂ corrosion”, “H₂S corrosion”, “advanced coating”, “nanocomposite”, “self-healing coating” y “cathodic protection”, mediante operadores AND y OR. Se consideraron documentos en español, inglés y portugués, debido al carácter regional del estudio y a la concentración internacional de investigaciones sobre recubrimientos y control de corrosión (Farh et al., 2023; Solovyeva et al., 2023). No se calculó una muestra probabilística, porque el corpus se seleccionó intencionalmente según pertinencia temática, suficiencia informativa y trazabilidad documental (Banco Central del Ecuador, 2025; EP Petroecuador, 2023).

La selección documental incluyó publicaciones emitidas entre enero de 2021 y diciembre de 2025 que abordaron infraestructuras petroleras metálicas, mecanismos de corrosión, integridad de ductos o materiales avanzados de protección. También se exigió autoría identificable, acceso al texto completo, descripción metodológica suficiente y exposición verificable de resultados, limitaciones o criterios técnicos. Los informes institucionales fueron aceptados cuando procedieron de organismos oficiales y presentaron datos relevantes para contextualizar la operación petrolera ecuatoriana. Se excluyeron duplicados, materiales comerciales sin respaldo metodológico, documentos sin fecha, estudios ajenos al sector energético y trabajos centrados en corrosión biomédica o arquitectónica sin posibilidad de transferencia industrial. La depuración se realizó sucesivamente mediante revisión del título, resumen, palabras clave y texto completo, manteniendo un registro de las razones de exclusión. Este procedimiento favoreció una síntesis reproducible y evitó equiparar resultados obtenidos bajo condiciones experimentales incompatibles, debido a que el comportamiento corrosivo varió según ambiente, microestructura, temperatura, pH y especies iónicas (Egbuhuzor et al., 2025; Snyder, 2019).

Cada documento seleccionado se registró en una matriz que incorporó autor, año, país, tipo de infraestructura, sustrato metálico, medio corrosivo, mecanismo de degradación,

variables operativas, tecnología protectora, método de evaluación y principales limitaciones. También se recopilaron indicadores técnicos como velocidad de corrosión, densidad de corriente, impedancia, resistencia de polarización, pérdida de espesor, adherencia, duración de exposición y eficiencia de inhibición, siempre que la fuente los informara. Las categorías deductivas comprendieron corrosión por CO₂, H₂S, picadura, erosión-corrosión, corrosión bajo aislamiento y deterioro microbiológicamente influenciado, además de protección catódica, inhibidores, nanocompuestos y recubrimientos autorreparables. Durante la lectura surgieron subcategorías inductivas asociadas con envejecimiento, compatibilidad ambiental, escalabilidad, preparación superficial y transferencia desde el laboratorio hacia condiciones industriales. El análisis de contenido comparó coincidencias, contradicciones y vacíos entre años, regiones, activos y familias de materiales, mientras que la síntesis temática articuló los hallazgos en patrones interpretativos (Braun & Clarke, 2021; Kuckartz & Rädiker, 2023). La evaluación consideró que las tecnologías inteligentes todavía presentaron diferencias entre el desempeño experimental y su aplicación prolongada en ambientes petroleros reales (Sanyal et al., 2024; Thomas et al., 2024).

La consistencia del análisis se reforzó mediante lecturas reiteradas, revisión de códigos, comparación de fuentes y conservación de una trazabilidad entre cada interpretación y el documento que la sustentó. La triangulación contrastó estudios experimentales, revisiones especializadas e informes oficiales, lo que permitió identificar convergencias sin ocultar diferencias metodológicas entre ensayos electroquímicos, pruebas de inmersión y evaluaciones de campo. Se evitó comparar directamente valores obtenidos con aceros, electrolitos, temperaturas o tiempos de exposición distintos, salvo cuando la equivalencia experimental estuvo explícitamente justificada. Un estudio sobre acero X65 en ambientes con CO₂, por ejemplo, mostró que la evolución de las capas de carbonato de hierro dependió de las condiciones de exposición, lo que respaldó la necesidad de interpretar cada resultado dentro de su configuración experimental (Lazareva et al., 2021). En el plano ético no se recopilaron datos personales ni se intervinieron instalaciones, comunidades o trabajadores, y el análisis se limitó a materiales públicos o académicamente accesibles, respetando autoría, propiedad intelectual y citación. Las conclusiones se formularon como descripciones contextualizadas y no como estimaciones causales o recomendaciones universales, en consonancia con el alcance cualitativo y documental adoptado (Braun & Clarke, 2021; Snyder, 2019).

3. Resultados

Variables operativas y ambientales asociadas con los mecanismos de corrosión

El análisis de esta dimensión examinó la respuesta del acero de tuberías frente a la temperatura, la salinidad, el CO₂, la actividad de bacterias reductoras de sulfato y la acumulación de depósitos. Los datos cuantitativos verificables disponibles para este subapartado procedieron de tres estudios primarios realizados con aceros L245 y API 5L X65 en ambientes controlados. La documentación analizada no incorporó una base consolidada con el número total de registros codificados, por lo que no se calcularon frecuencias globales, intervalos de confianza ni pruebas de significación para el conjunto documental. Tampoco se identificaron valores económicos comparables asociados con

cada condición de exposición. En consecuencia, los indicadores presentados correspondieron exclusivamente a mediciones experimentales publicadas y a variaciones porcentuales calculadas a partir de esos valores (Lazareva et al., 2021; Liao et al., 2023; Sun et al., 2025).

La acción conjunta de la temperatura, el CO₂ y la actividad microbiológica mostró un aumento de la pérdida de material respecto de la exposición exclusivamente química. En acero L245 sometido a una presión parcial de CO₂ de 0,06 MPa, la velocidad de corrosión registrada a 40 °C fue de 0,0597 mm/año en el sistema con CO₂ y de 0,0766 mm/año cuando participaron bacterias reductoras de sulfato. La diferencia absoluta alcanzó 0,0169 mm/año, mientras que el incremento relativo calculado fue del 28,3 % respecto del valor asociado únicamente con CO₂. Los registros experimentales también mostraron que la intensidad del deterioro varió con la temperatura debido a los cambios observados en la actividad bacteriana y en la composición de los productos superficiales. Este patrón indicó que la presencia simultánea de agentes químicos y biológicos produjo una velocidad de corrosión superior a la obtenida en el medio abiótico bajo la condición térmica señalada (Sun et al., 2025).

La evolución temporal de las capas de carbonato de hierro presentó un comportamiento distinto entre la corrosión general y el daño localizado. En acero API 5L X65 expuesto a una solución de NaCl al 3,5 %, saturada con CO₂, a 80 °C y pH 6,8, la velocidad general alcanzó un máximo de 1,66 mm/año a las 6 horas y descendió a 0,05 mm/año a las 43 horas, lo que representó una reducción calculada del 97,0 %. La cobertura superficial de FeCO₃ aumentó de aproximadamente 42 % a las 9 horas a 51 % a las 22 horas y 99 % a las 43 horas. Sin embargo, la profundidad media de las diez picaduras más profundas pasó de $3,2 \pm 0,4 \mu\text{m}$ a $5,6 \pm 0,9 \mu\text{m}$ y posteriormente a $8,5 \pm 0,2 \mu\text{m}$; entre la primera y la última medición, el aumento calculado fue del 165,6 %. De forma paralela, el diámetro medio de las picaduras creció de $8,4 \pm 1,4 \mu\text{m}$ a $37,0 \pm 5,2 \mu\text{m}$, equivalente a un incremento del 340,5 %, aun cuando la velocidad de corrosión general disminuyó (Lazareva et al., 2021).

La combinación de depósitos sólidos y actividad microbiológica confirmó la divergencia entre pérdida uniforme y penetración localizada. En acero X65 expuesto a un ambiente simulado de producción de gas de esquisto, la coexistencia de depósitos de arena y bacterias reductoras de sulfato redujo en 63 % la corrosión uniforme, pero incrementó en 183 % la velocidad de corrosión localizada. Los resultados electroquímicos y morfológicos registraron la formación de una capa mixta de depósito, biopelícula y productos de corrosión, junto con zonas de ataque concentrado en la interfaz entre el acero y el depósito. El contraste entre ambos porcentajes evidenció una diferencia de 246 puntos porcentuales entre la variación del deterioro uniforme y la del ataque localizado. En síntesis, los hallazgos mostraron que la temperatura, el CO₂, la salinidad, el tiempo de exposición, los microorganismos y los depósitos no actuaron de manera aislada: determinadas condiciones redujeron la pérdida general de espesor, pero simultáneamente aumentaron la profundidad y extensión de las picaduras (Liao et al., 2023).

Desempeño comparativo de los materiales de protección avanzada

El análisis comparativo tuvo como propósito describir el comportamiento de tres familias de materiales avanzados: recubrimientos epóxicos nanocompuestos, sistemas

autorreparables con microcápsulas y superficies superhidrofóbicas modificadas con estructuras metal-orgánicas. Los estudios seleccionados evaluaron acero Q235, láminas de acero previamente oxidadas y acero inoxidable mediante envejecimiento ultravioleta, daño mecánico, inmersión salina y ensayos electroquímicos. Los indicadores recuperados incluyeron impedancia a baja frecuencia, adherencia, concentración de aditivos, tamaño de microcápsula, duración de la protección, ángulo de contacto y eficiencia anticorrosiva. La heterogeneidad de los sustratos, electrolitos y periodos de exposición impidió calcular una media combinada entre las tres tecnologías. En los datos comparables tampoco se dispuso de valores p , intervalos de confianza ni costos económicos estandarizados. Por esta razón, los resultados se organizaron mediante comparaciones internas entre cada formulación avanzada y su respectivo material de referencia (Han et al., 2022; Almufarij et al., 2023; Li et al., 2024).

El recubrimiento epóxico formulado con 0,2 % en peso de óxido de grafeno modificado con melamina y negro de carbono presentó el mayor desempeño dentro de las concentraciones evaluadas sobre acero Q235. Después de 20 días de envejecimiento ultravioleta, su módulo de impedancia a baja frecuencia alcanzó $1,09 \times 10^8 \Omega \cdot \text{cm}^2$, frente a $9,05 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$ registrados por el epoxi puro. La razón entre ambos valores fue de 12,04, lo que representó un incremento relativo calculado del 1.104,4 %. La adherencia disminuyó de 2,51 a 1,97 MPa durante el mismo periodo, equivalente a una reducción del 21,5 %. A pesar de esta pérdida, el material conservó el 78,5 % de su adherencia inicial. Los datos mostraron, por tanto, una elevada retención de propiedades mecánicas acompañada por una diferencia superior a un orden de magnitud en el indicador electroquímico respecto del control (Li et al., 2024).

Tabla 1

Comparación de los principales indicadores de desempeño de los materiales de protección avanzada

Familia tecnológica	Sustrato condición ensayo	y de	Formulación evaluada	Indicador de referencia	de	Resultado material avanzado	del	Variación calculada o resultado complementario
Epoxi nanocompuesto	Acero Q235; 20 días de envejecimiento UV	de	Epoxi con 0,2 % de MGC	Impedancia del epoxi puro: $9,05 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$		$1,09 \times 10^8 \Omega \cdot \text{cm}^2$		12,04 veces el control; incremento de 1.104,4 %
Epoxi nanocompuesto	Acero Q235; 20 días de envejecimiento UV	de	Epoxi con 0,2 % de MGC	Adherencia inicial: 2,51 MPa		Adherencia final: 1,97 MPa		Disminución de 21,5 %; retención de 78,5 %
Sistema autorreparable	Acero oxidado con daño artificial; inmersión en NaCl	daño	Epoxi con 15 % de microcápsulas PANI/epoxi-UF	No se informó un control directamente comparable		$5,27 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$ a 0,01 Hz después de 24 h		Protección del área rayada durante 384 h
Sistema autorreparable	Caracterización de las microcápsulas	las	Núcleo PANI/epoxi encapsulado en	No aplicó		Contenido de núcleo: $60,84 \pm 0,06$ %		La formulación de 15 % presentó el mejor desempeño informado

Familia tecnológica	Sustrato condición ensayo	y de	Formulación evaluada	Indicador de referencia	Resultado del material avanzado	Variación calculada resultado complementario	o
			urea-formaldehído		diámetro: 4,20 ± 0,92 µm		
Superficie superhidrofóbica	Acero inoxidable; NaCl 0,5 M		Ni@SA frente a Ni@Cu-As MOF@SA	Ángulo de contacto: 160° ± 1,1°	168° ± 1,2°	Aumento absoluto de 8° y relativo de 5,0 %	
Superficie superhidrofóbica	Acero inoxidable; prueba de abrasión		Ni@SA frente a Ni@Cu-As MOF@SA	Conservación hasta 1.300 mm	Conservación hasta 2.700 mm	Incremento de 107,7 % en la longitud de abrasión	
Superficie superhidrofóbica	Acero inoxidable; NaCl 0,5 M		Ni@SA frente a Ni@Cu-As MOF@SA	Eficiencia aproximada: 94 %	Eficiencia aproximada: 99 %	Diferencia de 5 puntos porcentuales	

Nota. Los porcentajes de variación se calcularon a partir de los valores publicados; no correspondieron a estimaciones combinadas entre estudios. MGC representó el nanohíbrido de óxido de grafeno modificado con melamina y negro de carbono; PANI/epoxi–UF correspondió al copolímero polianilina/epoxi encapsulado en urea-formaldehído (Han et al., 2022; Almufarij et al., 2023; Li et al., 2024)

El sistema autorreparable alcanzó su mejor respuesta con una incorporación de 15 % en peso de microcápsulas, cuyo contenido de núcleo fue de 60,84 ± 0,06 % y cuyo diámetro medio llegó a 4,20 ± 0,92 µm. Después de inducir una incisión y mantener la probeta durante 24 horas en una solución de NaCl, el módulo de impedancia a 0,01 Hz se situó en 5,27 × 10⁶ Ω·cm². La protección del área dañada se mantuvo durante 384 horas, equivalentes a 16 días de exposición. En las superficies superhidrofóbicas, el ángulo de contacto aumentó de 160° ± 1,1° en Ni@SA a 168° ± 1,2° en Ni@Cu-As MOF@SA. La longitud de abrasión conservada pasó de 1.300 a 2.700 mm, incremento calculado del 107,7 %, mientras que la eficiencia anticorrosiva aumentó de aproximadamente 94 % a 99 %. La modificación con la estructura metal-orgánica produjo así mejoras simultáneas en repelencia al agua, estabilidad mecánica y respuesta frente al medio salino (Han et al., 2022; Almufarij et al., 2023).

La síntesis de los resultados evidenció que las tres familias concentraron su desempeño en dimensiones diferentes y no directamente intercambiables. El nanocompuesto epóxico alcanzó la mayor impedancia absoluta del conjunto analizado, con 1,09 × 10⁸ Ω·cm² después del envejecimiento ultravioleta. El sistema microencapsulado destacó por conservar la protección durante 384 horas después del daño inducido, mientras que la superficie con MOF presentó una eficiencia anticorrosiva cercana al 99 %. Las desviaciones estándar solo estuvieron disponibles para el tamaño de las microcápsulas y los ángulos de contacto, de modo que no se establecieron diferencias estadísticas entre las familias. Tampoco se identificaron valores homogéneos sobre costo de aplicación, mantenimiento o vida útil industrial que permitieran una comparación financiera. El hallazgo central quedó definido por la mejora de cada material frente a su control experimental, aunque los distintos protocolos impidieron establecer una jerarquía universal de desempeño (Han et al., 2022; Almufarij et al., 2023; Li et al., 2024).

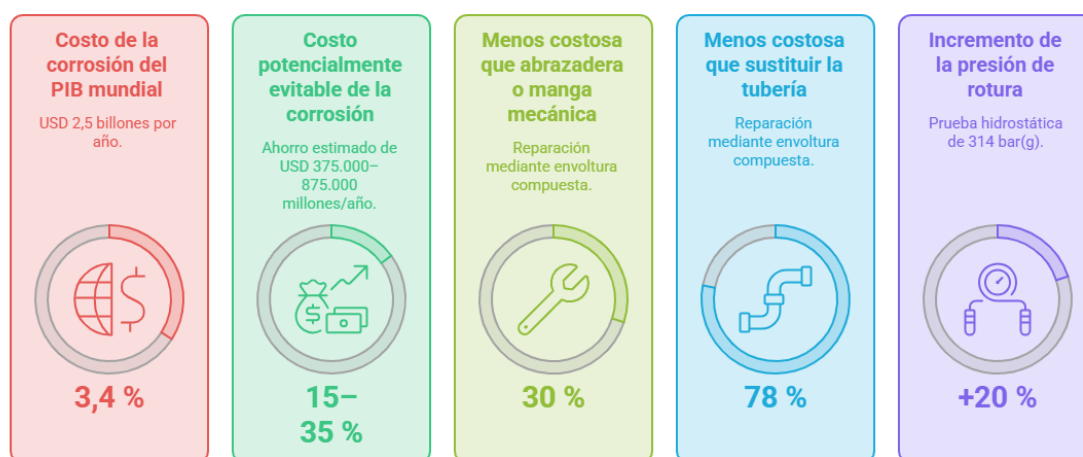
Conveniencia técnico-económica de las alternativas anticorrosivas

La evaluación de la conveniencia técnico-económica examinó los costos evitables de la corrosión, la capacidad de prolongar la operación de los activos y las diferencias entre reparación localizada, rehabilitación y sustitución de tuberías. El corpus aportó datos cuantitativos para la gestión global de la corrosión y para los sistemas de envoltura compuesta, pero no presentó valores homogéneos de inversión, operación y mantenimiento para recubrimientos nanocompuestos, autorreparables o superhidrofóbicos. Tampoco se identificaron estimaciones específicas para infraestructuras petroleras ecuatorianas que permitieran calcular valor actual neto, tasa interna de retorno o periodo de recuperación. Las comparaciones se limitaron, por tanto, a costos relativos, duración reportada, resistencia recuperada y carga ambiental durante el ciclo de vida. Debido a esta heterogeneidad, no se obtuvieron medias agrupadas, desviaciones estándar, intervalos de confianza ni diferencias estadísticamente significativas entre tecnologías (Shaukat et al., 2022; Singh et al., 2021; Prošek et al., 2025).

La escala financiera de referencia mostró que la corrosión representó aproximadamente USD 2,5 billones anuales, equivalentes al 3,4 % del producto interno bruto mundial. La aplicación sistemática de tecnologías y prácticas de control presentó un potencial de reducción comprendido entre el 15 % y el 35 % de ese costo. En términos monetarios, el ahorro estimado se situó entre USD 375.000 millones y USD 875.000 millones por año, con una amplitud de USD 500.000 millones entre los extremos calculados. Para las tuberías de petróleo y gas en Estados Unidos, la literatura utilizada por los estudios de reparación ubicó las pérdidas anuales por corrosión entre USD 2.000 millones y USD 3.300 millones. Estos valores funcionaron como magnitudes sectoriales de referencia y no como una estimación directa de costos para Ecuador o Latinoamérica (Association for Materials Protection and Performance [AMPP], 2023; Shaukat et al., 2022).

Figura 1

Conveniencia técnica- económico de las alternativas anticorrosivos



La reparación mediante envoltura compuesta ofrece ahorros significativos en comparación con las abrazaderas mecánicas y la sustitución de tuberías, pero tiene un mayor impacto ambiental.

Nota: Autores (2025)

La lectura integrada de la imagen evidenció que la alternativa de menor costo directo no coincidió necesariamente con la de menor carga ambiental. En la evaluación de ciclo de vida realizada para un periodo funcional de diez años se compararon cuatro procedimientos: parche soldado, recrecimiento mediante soldadura, abrazadera mecánica y envoltura compuesta no metálica. El parche soldado registró el menor impacto ambiental, mientras que la envoltura compuesta presentó la mayor carga agregada dentro de las condiciones analizadas. El transporte del sistema compuesto y los materiales empleados en la abrazadera mecánica concentraron una parte relevante de los impactos observados. En consecuencia, los datos económicos relativos de la envoltura compuesta coexistieron con un desempeño ambiental menos favorable en ese escenario específico de reparación (Shaukat et al., 2022; Prošek et al., 2025).

La síntesis descriptiva mostró que la gestión preventiva ofreció el mayor margen económico agregado, con un ahorro potencial equivalente al 15–35 % del costo global de la corrosión. Entre las soluciones de reparación documentadas, la envoltura compuesta concentró la principal ventaja financiera, al reducir entre 30 % y 78 % los costos relativos frente a intervenciones metálicas o sustituciones, y recuperó parcialmente la capacidad resistente de la tubería. Esta conveniencia no pudo extrapolarse directamente a los recubrimientos avanzados analizados previamente, debido a la ausencia de precios estandarizados, duraciones industriales verificadas y registros de mantenimiento comparables. Los documentos tampoco permitieron establecer una tecnología universalmente superior al integrar inversión, vida útil, interrupción operativa e impacto ambiental. El hallazgo central quedó definido por una relación condicionada: la conveniencia técnico-económica varió según el defecto, la continuidad operativa, el horizonte temporal y el alcance del ciclo de vida considerado (AMPP, 2023; Shaukat et al., 2022; Singh et al., 2021).

4. Discusión

El estudio analiza los mecanismos de corrosión y el desempeño de materiales de protección avanzada aplicables a ductos, tanques y equipos estáticos, y los hallazgos sugieren que la integridad de estos activos depende de la interacción entre condiciones químicas, térmicas, biológicas y superficiales. La reducción de la corrosión general observada durante la formación de capas de FeCO_3 no implica necesariamente una disminución del riesgo, porque el crecimiento simultáneo de las picaduras revela que los indicadores promedio pueden ocultar ataques localizados críticos. De manera concordante, la incorporación de bacterias reductoras de sulfato incrementa en 28,3 % la velocidad de corrosión del acero L245 bajo la condición analizada, mientras que la combinación de depósitos y actividad microbiológica reduce la corrosión uniforme, pero eleva en 183 % el deterioro localizado. Este comportamiento coincide con las revisiones que reconocen al CO_2 , al H_2S , a los microorganismos y a los depósitos como factores interdependientes en el deterioro de tuberías petroleras (Solovyeva et al., 2023; Egbuhuzor et al., 2025). Por consiguiente, los hallazgos parecen indicar que el

seguimiento basado únicamente en pérdida general de espesor resulta insuficiente y debe complementarse con indicadores sensibles a picaduras, interfaces bajo depósito y actividad microbiológica, sin inferir causalidad más allá de las condiciones experimentales examinadas (Lazareva et al., 2021; Liao et al., 2023; Sun et al., 2025).

La comparación de materiales avanzados muestra que las tecnologías evaluadas no presentan una superioridad universal, sino ventajas asociadas con mecanismos protectores y condiciones de ensayo diferentes. El nanocompuesto epóxico alcanza una impedancia 12,04 veces superior a la del epoxi puro después del envejecimiento ultravioleta, aunque conserva el 78,5 % de su adherencia inicial, lo que evidencia una mejora electroquímica acompañada por una pérdida mecánica que no debe ignorarse. A su vez, el sistema microencapsulado mantiene la protección del área dañada durante 384 horas, mientras que la superficie modificada con una estructura metal-orgánica alcanza aproximadamente 99 % de eficiencia anticorrosiva y duplica la longitud de abrasión soportada. Estas respuestas convergen con las revisiones que atribuyen a los nanomateriales, microcontenedores y superficies multifuncionales capacidades de barrera, liberación activa y autorreparación (Sanyal et al., 2024; Thomas et al., 2024). Sin embargo, la divergencia entre sustratos, electrolitos, concentraciones y tiempos de exposición confirma la advertencia de que el rendimiento de laboratorio no garantiza estabilidad durante ciclos industriales prolongados, por lo que cada formulación requiere validación según el activo y el ambiente de servicio (Kartsonakis et al., 2024; Han et al., 2022; Almufarij et al., 2023; Li et al., 2024).

La dimensión económica refuerza la conveniencia de priorizar una gestión preventiva y diferenciada, dado que el costo mundial de la corrosión alcanza aproximadamente USD 2,5 billones anuales y las prácticas sistemáticas de control podrían evitar entre 15 % y 35 % de esa carga. Dentro de las intervenciones documentadas, la envoltura compuesta presenta costos 30 % inferiores a los de abrazaderas o mangas mecánicas y 78 % menores que los de sustitución, además de aumentar en 20 % la presión de rotura de la tubería defectuosa evaluada (AMPP, 2023; Singh et al., 2021). No obstante, el análisis de ciclo de vida muestra que esta alternativa registra una carga ambiental mayor que el parche soldado en el escenario considerado, principalmente por el transporte y los materiales empleados. Esta aparente divergencia indica que la menor inversión directa no equivale necesariamente a la mayor sostenibilidad y que la conveniencia debe considerar simultáneamente vida útil, interrupciones operativas, resistencia recuperada, mantenimiento e impacto ambiental (Shaukat et al., 2022; Prošek et al., 2025). En el contexto ecuatoriano, donde los activos sostienen exportaciones valoradas en USD 8.646,54 millones durante 2024, esta interpretación favorece decisiones basadas en criticidad y costo del ciclo de vida, más que en la selección uniforme de una tecnología (Banco Central del Ecuador, 2025; Farh et al., 2023).

El alcance de estos resultados debe interpretarse con cautela porque el diseño cualitativo, documental y no experimental no permite establecer relaciones causales ni generalizar el desempeño observado a toda la infraestructura petrolera ecuatoriana o latinoamericana. La ausencia de una muestra documental consolidada, de protocolos electroquímicos homogéneos y de datos locales sobre costos por metro, vida útil, valor actual neto, mantenimiento y frecuencia de fallas impide realizar metaanálisis o comparaciones financieras directas entre materiales. A ello se suma que gran parte de la evidencia procede de ensayos acelerados con sustratos y medios controlados, lo cual

limita su transferencia a activos envejecidos sometidos simultáneamente a presión, abrasión, humedad tropical, salinidad y variaciones operativas (Thomas et al., 2024; Kuckartz & Rädiker, 2023). Las investigaciones posteriores deberían estandarizar los criterios de evaluación, efectuar pruebas de campo en ambientes amazónicos, andinos y costeros, integrar protección catódica con recubrimientos inteligentes y desarrollar análisis técnico-económicos y ambientales durante periodos prolongados. Pese a estas restricciones, el estudio aporta un marco que conecta mecanismos localizados, desempeño multifuncional y conveniencia del ciclo de vida, con lo cual atiende la brecha existente entre la eficacia experimental de los materiales y su selección contextualizada para infraestructuras petroleras estratégicas (Farh et al., 2023; Kumari & Lavanya, 2024).

5. Conclusiones

Los resultados permiten concluir que la corrosión en ductos, tanques y equipos estáticos petroleros constituye un proceso multivariable cuyo comportamiento depende de la interacción entre temperatura, salinidad, CO₂, H₂S, microorganismos, depósitos y condición superficial. La reducción de la corrosión uniforme no representa necesariamente una disminución del riesgo, puesto que puede coexistir con el crecimiento de picaduras y otras formas de deterioro localizado. En consecuencia, la evaluación de la integridad no debe apoyarse únicamente en la pérdida promedio de espesor. Los materiales de protección avanzada muestran mejoras relevantes en resistencia electroquímica, capacidad de autorreparación y repelencia al agua, aunque su desempeño permanece condicionado por el sustrato y el ambiente de exposición. Dentro del alcance documental del estudio, no se identifica una tecnología universalmente superior para todas las infraestructuras y condiciones operativas analizadas.

La integración de los objetivos específicos evidencia que las variables químicas, térmicas y biológicas modifican de manera diferenciada la corrosión general y localizada, como se observa en el incremento del 28,3 % asociado con la presencia de bacterias reductoras de sulfato bajo la condición evaluada. El recubrimiento epóxico nanocompuesto alcanza una impedancia 12,04 veces mayor que el material de referencia, mientras el sistema microencapsulado conserva la protección durante 384 horas después del daño inducido y la superficie superhidrofóbica obtiene una eficiencia cercana al 99 %. Estos indicadores reflejan ventajas complementarias, pero no directamente comparables entre sí por las diferencias experimentales. En el plano económico, la gestión preventiva presenta un ahorro potencial del 15 % al 35 % del costo de la corrosión, y las envolturas compuestas reducen los costos relativos de reparación entre 30 % y 78 %. En conjunto, los hallazgos evidencian que la selección tecnológica debe responder al mecanismo de deterioro, la criticidad del activo y el horizonte de servicio considerado.

El principal aporte de la investigación consiste en articular los mecanismos de corrosión, el desempeño multifuncional de los materiales y la conveniencia técnico-económica dentro de un marco común de evaluación. Esta integración permite superar las decisiones fundamentadas únicamente en eficiencia electroquímica o costo inicial, al incorporar adherencia, durabilidad, mantenibilidad, recuperación de resistencia e

impacto ambiental. Para la industria petrolera ecuatoriana, cuya infraestructura sostiene exportaciones valoradas en USD 8.646,54 millones durante 2024, este enfoque favorece la priorización de intervenciones según exposición, antigüedad y consecuencias potenciales de falla. En el ámbito profesional, los resultados apoyan una gestión diferenciada de ductos, tanques y equipos estáticos, evitando aplicar soluciones uniformes ante condiciones corrosivas heterogéneas. Esto sugiere que la protección avanzada adquiere mayor valor cuando se integra con inspección, monitoreo y mantenimiento sistemático durante el ciclo de vida del activo.

A partir de los resultados, se recomienda validar las tecnologías seleccionadas mediante ensayos de campo en ambientes amazónicos, andinos y costeros, sin extrapolar directamente el rendimiento obtenido en condiciones controladas. Las investigaciones futuras deberían emplear protocolos comparables de preparación superficial, espesor, composición del electrolito, temperatura, envejecimiento y duración de exposición. También resulta necesario construir bases de datos ecuatorianas con costos por metro intervenido, frecuencia de mantenimiento, vida útil, interrupciones operativas y desempeño ambiental. La combinación de protección catódica, recubrimientos inteligentes y monitoreo de corrosión localizada constituye otra línea pertinente para activos envejecidos. De este modo, la contribución central del estudio radica en aproximar la eficacia experimental de los materiales avanzados a una selección contextualizada, técnica y económicamente justificable para la protección de infraestructuras petroleras estratégicas.

Referencias Bibliográficas

- Almufarij, R. S., El Sayed, H. A. F., & Mohamed, M. E. (2023). Eco-friendly approach for the construction of superhydrophobic coating on stainless steel metal based on biological metal–organic framework and its corrosion resistance performance. *Materials*, 16(13), 4728. <https://doi.org/10.3390/ma16134728>.
- Association for Materials Protection and Performance. (2023, 14 de abril). *AMPP recognizes World Corrosion Awareness Day, impact of corrosion control*. <https://www.ampp.org/blogs/webmasternaceorg/2023/04/14/ampp-recognizes-world-corrosion-awareness-day-imp>
- Banco Central del Ecuador. (2025). *Boletín analítico del sector petrolero: Cuarto trimestre de 2024*. <https://contenido.bce.fin.ec/documentos/Estadisticas/Hidrocarburos/ASP202404.pdf>
- Braun, V., & Clarke, V. (2021). *Thematic analysis: A practical guide*. SAGE. <https://uk.sagepub.com/en-gb/eur/thematic-analysis/book248481>
- Cao, Q., Pojtanabuntoeng, T., Esmaily, M., Thomas, S., Brameld, M., Amer, A., & Birbilis, N. (2022). A review of corrosion under insulation: A critical issue in the oil and gas industry. *Metals*, 12(4), 561. <https://doi.org/10.3390/met12040561>
- Egbuhuzor, M., Akalezi, C., Ulaeto, S., Njoku, D., & Oguzie, E. (2025). A review of recent developments on the localized corrosion of mild steel used in the oil and gas industry. *Discover Materials*, 5, 250. <https://doi.org/10.1007/s43939-025-00438-w>

- EP Petroecuador. (2022). *Informe estadístico febrero 2022*.
<https://www.eppetroecuador.ec/wp-content/uploads/downloads/2022/03/INFORME-ESTADISTICO-FEBRERO-2022.pdf>
- Farh, H. M. H., Ben Seghier, M. E. A., & Zayed, T. (2023). A comprehensive review of corrosion protection and control techniques for metallic pipelines. *Engineering Failure Analysis*, 143, 106885. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106885>.
- Han, R., He, H., Liu, X., Zhao, L., Yang, Y., Liu, C.-B., & Zeng, R.-C. (2022). Anti-corrosion and self-healing coatings with polyaniline/epoxy copolymer–urea–formaldehyde microcapsules for rusty steel sheets. *Journal of Colloid and Interface Science*, 616, 605–617. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2022.02.088>.
- Kartsonakis, I. A., Kontiza, A., & Kanellopoulou, I. A. (2024). Advanced micro/nanocapsules for self-healing coatings. *Applied Sciences*, 14(18), 8396. <https://doi.org/10.3390/app14188396>.
- Kuckartz, U., & Rädiker, S. (2023). *Qualitative content analysis: Methods, practice and software* (2nd ed.). SAGE.
- Kumari, P., & Lavanya, M. (2024). Optimization strategies for corrosion management in industries with artificial neural network and response surface technology: A comprehensive review. *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*, 10, 59. <https://doi.org/10.1007/s40735-024-00863-z>
- Lazareva, A., Owen, J., Vargas, S., Barker, R., & Neville, A. (2021). Investigation of the evolution of an iron carbonate layer and its effect on localized corrosion of X65 carbon steel in CO₂ corrosion environments. *Corrosion Science*, 192, 109849. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109849>.
- Li, X., Gao, X., Liu, J., Dong, J., Wang, Y., Chen, J., Zhan, C., Yin, Y., & Nan, D. (2024). Bi-functional epoxy coating with long-term protection for Q235 steel prepared by incorporating melamine-grafted and carbon-black-modified graphene oxide. *Surface and Coatings Technology*, 485, 130883. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.130883>.
- Liao, W., Yuan, J., Wang, X., Dai, P., Feng, W., Zhang, Q., Fu, A., & Li, X. (2023). Under-deposit microbial corrosion of X65 pipeline steel in the simulated shale gas production environment. *International Journal of Electrochemical Science*, 18(3), 100069. <https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2023.100069>.
- Prošek, T., Keil, P., & Popova, K. (2025). Corrosion protection and sustainability: Why are the two concepts inherently intertwined. *Corrosion and Materials Degradation*, 6(3), 38. <https://doi.org/10.3390/cmd6030038>
- Sanyal, S., Park, S., Chelliah, R., Yeon, S.-J., Barathikannan, K., Vijayalakshmi, S., Jeong, Y.-J., Rubab, M., & Oh, D.-H. (2024). Emerging trends in smart self-healing coatings: A focus on micro/nanocontainer technologies for enhanced corrosion protection. *Coatings*, 14(3), 324. <https://doi.org/10.3390/coatings14030324>.
- Shaukat, M. M., Ashraf, F., Asif, M., Pashah, S., & Makawi, M. (2022). Environmental impact analysis of oil and gas pipe repair techniques using life cycle assessment (LCA). *Sustainability*, 14(15), 9499. <https://doi.org/10.3390/su14159499>

- Shehata, M. F., & El-Shamy, A. M. (2023). Hydrogen-based failure in oil and gas pipelines: A review. *Gas Science and Engineering*, 115, 204994. <https://doi.org/10.1016/j.jgsce.2023.204994>.
- Singh, D. K., Villamayor, A., & Hazra, A. (2021). Numerical and experimental analysis of Loctite adhesive composite wrapping on EN 10028 steel pipe. *Materials Today: Proceedings*, 44(6), 4158–4165. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.525>.
- Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104, 333–339. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>
- Solovyeva, V. A., Almuhammadi, K. H., & Badeghaish, W. O. (2023). Current downhole corrosion control solutions and trends in the oil and gas industry: A review. *Materials*, 16(5), 1795. <https://doi.org/10.3390/ma16051795>
- Solovyeva, V. A., Almuhammadi, K. H., & Badeghaish, W. O. (2023). Current downhole corrosion control solutions and trends in the oil and gas industry: A review. *Materials*, 16(5), 1795. <https://doi.org/10.3390/ma16051795>
- Sun, M., Wang, X., Cui, W., & Shi, C. (2025). Effect of temperature on corrosion of L245 steel under CO₂-SRB corrosion system. *Microorganisms*, 13(3), 500. <https://doi.org/10.3390/microorganisms13030500>.
- Thomas, P., Sahoo, B. N., Thomas, P. J., & Greve, M. M. (2024). Recent advances in emerging integrated anticorrosion and antifouling nanomaterial-based coating solutions. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 67550–67576. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33825-6>.

CONFLICTO DE INTERESES

“Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses”.