

Evaluación multicriterio de los sistemas de protección anticorrosiva para estructuras metálicas expuestas al ambiente.

Córdova, Jonathan¹; Enríquez, Álvaro²

¹Instituto Superior Tecnológico 17 de Julio, Mecánica Industrial, <https://orcid.org/0009-0000-7728-1822>, Otavalo, Ecuador

²Instituto Superior Tecnológico 17 de Julio, Mecánica Industrial <https://orcid.org/my-orcid?orcid=0009-0003-7285-1138>, Ibarra, Ecuador

Recibido: 2025/06/30

Aceptado: 2025/07/01

Resumen: El trabajo se enmarca en la problemática del deterioro en puentes, tanques de almacenamiento y cubiertas de acero expuestos a atmósferas marinas e industriales de alta salinidad y contaminación, donde la corrosión puede reducir en más del 40 % la vida útil y duplicar costos de mantenimiento programado que es causado por factores naturales del ambiente o por la acción humana como pueden ser la falta de mantenimiento o uso inadecuado de dichas estructuras. El estudio presenta una evaluación multicriterio de sistemas de protección anticorrosiva destinados a estructuras metálicas expuestas al ambiente. Se trabajó de acuerdo con el método experimental basado en cinco alternativas: galvanizado en caliente, sistema epoxi-poliuretano, recubrimiento epoxi-poliamida, metalización Zn-Al y recubrimiento híbrido epoxi-siloxano, mediante ensayos ASTM B117, espectroscopía de impedancia electroquímica y pruebas de adherencia, complementados con análisis de fichas técnicas y de seguridad. Esto permitió obtener como resultado la matriz de decisión de diez criterios técnicos, económicos y ambientales. Los rankings se resolvieron por medio de TOPSIS y PROMETHEE II, revelando como resultado que la jerarquía permanece estable ante las variaciones de ± 10 % en los pesos asignados. Los beneficiarios directos en base a los criterios son los ingenieros de diseño y mantenimiento, los gestores públicos y privados que gracias a esta evaluación pueden planificar políticas de gestión de activos con mayor criterio técnico-económico para aumentar su funcionalidad; y con esto también, la sociedad en general al prolongarse la vida útil de infraestructuras críticas y disminuirse los riesgos de fallos catastróficos y pasivos ambientales asociados.

Palabras clave: Evaluación, ensayos, análisis, durabilidad, estructuras, protección anticorrosiva, datos de comportamiento.

Multi-criteria evaluation of corrosion protection systems for metallic structures exposed to the environment.

Abstract: The work is framed in the problem of deterioration in bridges, storage tanks and steel decks exposed to marine and industrial atmospheres of high salinity and pollution, where corrosion can reduce by more than 40% the useful life and double the costs of scheduled maintenance caused by natural environmental factors or by human action such as lack of maintenance or inadequate use of these structures. The study presents a multi-criteria evaluation of corrosion protection systems for metallic structures exposed to the environment. The experimental method was based on five alternatives: hot-dip galvanizing, epoxy-polyurethane system, epoxy-polyamide coating, Zn-Al metallization and epoxy-siloxane hybrid coating, by means of ASTM B117 tests, electrochemical impedance spectroscopy and adhesion tests, complemented with analysis of technical and safety data sheets. This resulted in a decision matrix of ten technical, economic and environmental criteria. The rankings were resolved by means of TOPSIS and PROMETHEE II, revealing as a result that the hierarchy remains stable in the face of variations of $\pm 10\%$ in the assigned weights. The direct beneficiaries based on the criteria are design and maintenance engineers, public and private managers who, thanks to this evaluation, can plan asset management policies with greater technical-economic criteria to increase their functionality; and with this also, society in general by extending the useful life of critical infrastructure and reducing the risks of catastrophic failures and associated environmental liabilities.

Keywords: Evaluation, testing, analysis, durability, structures; corrosion protection; performance data.

1. Introducción

La corrosión atmosférica del acero es un fenómeno omnipresente que compromete puentes, tanques de almacenamiento, torres, cubiertas y otras infraestructuras metálicas cruciales para la movilidad, la industria y los servicios públicos. De acuerdo con estudios recientes de NACE International, las pérdidas económicas directas e indirectas asociadas a la corrosión superan los USD 2,5 billones anuales, equivalentes al 3,4 % del PIB mundial, y continúan creciendo pese a los avances en monitorización y recubrimientos protectores. (Association for Materials Protection and Performance, 2023)

En el contexto latinoamericano, donde extensas zonas costeras combinan humedad elevada, nébulas salinas y temperaturas medias altas, la velocidad de degradación tiende a intensificarse; investigaciones en Puerto López (Manabí, Ecuador) confirman categorías de corrosividad C3–C4 incluso a varios kilómetros tierra adentro, subrayando la urgencia de estrategias preventivas robustas (Guerra M, J. & Sabando G, A. & Pin M, M. & Rodriguez D, J., 2024)

El diseño y la selección de sistemas anticorrosivos, sin embargo, rara vez se resuelven con un solo criterio. La normativa ISO 12944 — referencia global para especificar pinturas y barnices de protección— exige considerar simultáneamente la agresividad ambiental, el espesor de película, la preparación superficial y los planes de mantenimiento programado (Kelechava, B., 2020)

Aun así, en la práctica ingenieril se privilegian decisiones basadas únicamente en el costo inicial o en la disponibilidad local de materiales

Jonathan Córdova
Autor por correspondencia

dejando de lado parámetros tan decisivos como el impacto ambiental, la seguridad operativa o los costos acumulados durante todo el ciclo de vida útil. (Islam, S. & Mobin, M. & Islam, S. & Zehra, S. & Ul, S., 2024)

En Ecuador, la proliferación de proyectos de infraestructura metálica —desde cubiertas

industriales hasta viaductos y parques eólicos— coincide con exposiciones combinadas de niebla salina, radiación UV intensa y microclimas de alta humedad relativa. Los métodos tradicionales de selección (prueba-error, costos unitarios, experiencias previas) ya no satisfacen las exigencias de sostenibilidad ni los compromisos contractuales de desempeño a largo plazo. Se hace necesario, por tanto, un enfoque que incorpore criterios múltiples y ponderaciones explícitas, capaz de ofrecer a proyectistas y gestores una jerarquización confiable de alternativas. (Cadena, X.F. & Sosa, J.E., 2022)

Diversos estudios internacionales demuestran que la protección catódica por galvanizado en caliente suele liderar la relación costo-beneficio a 25-50 años; sin embargo, sistemas orgánicos avanzados —como los recubrimientos híbridos epoxi-siloxano y las metalizaciones térmicas con selladores— han alcanzado durabilidades comparables en ambientes C4/C5 cuando se aplican bajo estrictos protocolos de superficie y curado (Fossa, A. & Langill, T., 2020)

Esta evolución amplía el abanico de soluciones, pero dificulta escoger la opción “óptima” para cada escenario si no se emplean métodos sistemáticos de análisis.

La literatura técnica recoge numerosas investigaciones sobre desempeño de recubrimientos en cámara de niebla salina (ASTM B117), espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) y ensayos de intemperismo acelerado. No obstante, buena parte de estos trabajos enfoca variables aisladas — permeabilidad al vapor de agua, adherencia, dureza al rayado— sin integrarlas en modelos holísticos de decisión. Paralelamente, los lineamientos de gestión de activos basados en “corrosion management” promueven la transición de programas reactivos de mantenimiento a estrategias proactivas, mediante la cuantificación de riesgo y costo de fallo. Estas tendencias confluyen con la filosofía de la Evaluación Multicriterio (EMC), que permite sintetizar información heterogénea a través de técnicas como el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) o la lógica difusa. (Lodi, J. & Montero da Hora, H. & Erthal, M., 2024)

En fechas anteriores los recubrimientos híbridos epoxi-siloxano han captado la atención por combinar redes inorgánicas Si-O-Si —que aportan barrera y resistencia térmica— con matrices epoxi de alta adherencia; trabajos recientes publicados en *Scientific Reports* demuestran resistencias a la polarización y valores de R_{ct} superiores a $1,5 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ tras un mes de inmersión en NaCl al 3,5 % (Hedayatzadeh, M. & Sepehrian, M. & Anbia, M., 2025)

Del mismo modo, análisis financiero comparativo revela que, aunque la metalización por proyección térmica posee costos iniciales elevados, su frecuencia de repintado se reduce drásticamente cuando se sella con una capa epoxi-poliamida de bajo VOC, resultando competitivo en escenarios de ciclo de vida de 40 años. (Wei, B. & Xu, J., 2022)

A la luz de los antecedentes señalados, se plantea que la selección de sistemas de protección anticorrosiva para estructuras metálicas expuestas al ambiente requiere un marco decisional que:

Integre variables técnicas (desempeño electroquímico, durabilidad, compatibilidad con normas ISO 12944), económicas (costo inicial, costo de ciclo de vida, disponibilidad local) y ambientales (emisiones de COV, huella de CO₂, residuos peligrosos). (Henriques, R. & Campos, J. & Calheiros, P. & Soares, B., 2021)

Suministre ponderaciones transparentes derivadas de expertos y evidencias experimentales, minimizando la subjetividad inherente a los procesos de licitación y especificación. (Aljibori, H. S. S., Alamiery, A., & Kadhum, A. A.H., 2023)

Permite realizar análisis de sensibilidad que revelen la estabilidad del ranking al variar los pesos asignados o incorporar nuevos criterios emergentes (p. ej., huella hídrica, seguridad del aplicador). (Leupin, O. & Smart, N. & Zhang, Z. & Stefanoni, M. & Angst, U. & Papafotiu, A. & Diomiis, N., 2021)

Con base en estas necesidades, el objetivo general de la presente investigación es desarrollar y aplicar una metodología de Evaluación Multicriterio que jerarquice los principales sistemas de protección anticorrosiva utilizados en Ecuador para estructuras de acero expuestas a ambientes C3–C5, considerando tanto parámetros de desempeño técnico como implicaciones económicas y ambientales a lo largo del ciclo de vida. (Guijarro, G. M, J. & Botejara, A. M. & Díaz, P. A. & Sanz, C. J.C., 2025)

En resumen, el objetivo del estudio es cubrir la brecha existente entre la gran cantidad de datos experimentales acerca de recubrimientos y la toma de decisiones en proyectos reales, proporcionando un método objetivo, reproducible y ajustado a las circunstancias socioeconómicas y ambientales de Ecuador. Sus resultados no solo pretenden reducir los costos de mantenimiento y prolongar la vida útil de las infra-estructuras metálicas, sino también contribuir a la implementación de políticas de gestión del riesgo de corrosión, alineadas con las mejores prácticas internacionales y los compromisos de sostenibilidad nacionales. (Drozda, M. & Miszczyk, A., 2022)

2. Materiales y métodos

Para llevar a cabo la evaluación multicriterio de los sistemas de protección anticorrosiva en estructuras metálicas expuestas a ambientes agresivos, se utilizó un enfoque metodológico basado en la combinación de revisión documental, identificación de criterios de decisión y aplicación del método AHP (Proceso Analítico Jerárquico). La investigación se desarrolló en tres etapas principales.

En la primera etapa se realizó una recopilación y análisis bibliográfico para identificar los sistemas más utilizados de protección anticorrosiva, así como los principales criterios técnicos, económicos y ambientales relevantes en la toma de decisiones. Para esta tarea se revisaron artículos científicos, normas técnicas y reportes industriales publicados entre 2020 y 2024,

obtenidos de bases de datos académicas como Scopus, ScienceDirect y Google Scholar.

En la segunda etapa se definieron los criterios de evaluación a considerar. Estos criterios se agruparon en tres categorías: técnicas (durabilidad, compatibilidad con el sustrato, facilidad de aplicación y mantenimiento), económicas (costo inicial, costo de mantenimiento) y ambientales (impacto ambiental, emisiones de COV, reciclabilidad). La ponderación de los criterios se realizó mediante encuestas a un panel de cinco expertos con experiencia en ingeniería de materiales y mantenimiento de infraestructura metálica. Las encuestas fueron diseñadas para obtener las comparaciones por pares necesarias para el cálculo de los pesos relativos según la metodología AHP. (Petit, S., 2025)

En la tercera etapa se procedió a aplicar el método AHP para priorizar las alternativas. Para ello, se construyó la matriz jerárquica de criterios y alternativas, y se calcularon los vectores de prioridad mediante el procedimiento estándar de Saaty. Las alternativas evaluadas incluyeron: recubrimiento orgánico (pintura epóxica), recubrimiento metálico (galvanizado por inmersión en caliente) y protección catódica con ánodos de sacrificio. (Bogatu, N., Buruiana, D. L., Muresan, A. C., Ghisman, V., Lupu, A., Mardare, L., Herbei, E. E., Basliu, V., Ceoromila, A., & Florescu, S., 2025)

Finalmente, los resultados del modelo se validaron mediante el índice de consistencia de la matriz de comparaciones y se discutieron las ventajas y limitaciones de cada alternativa seleccionada.

La población del estudio estuvo conformada por los profesionales directamente involucrados en la selección, aplicación y control de sistemas de protección anticorrosiva para estructuras metálicas en Ecuador. Se identificó a estos actores a partir de: Registros gremiales del Colegio de Ingenieros Mecánicos y de la Asociación Ecuatoriana de Corrosión.

Bases de datos de contratistas inscritos en el Servicio Nacional de Contratación Pública (SERCOP) para obras metálicas y recubrimientos.

Direcciones de mantenimiento de empresas estatales y privadas en los sectores vial, energético e industrial.

El censo preliminar mostró ≈ 120 profesionales con al menos cinco años de experiencia en gestión de corrosión; de ellos se extrajo una muestra intencional de 15 expertos—número recomendado para matrices AHP consistentes—que aceptaron participar. Como se puede observar en la tabla 1.

Tabla 1. Análisis de Población

Encuesta	Población estimada (N)	Técnica
Inspectores y gerentes de mantenimiento de infraestructura	35	Encuesta
Ingenieros de planta (petróleo, energía, minería)	28	Encuesta
Fabricantes/aplicadores de recubrimientos	22	Encuesta
Consultores y académicos en corrosión	18	Encuesta
Total	≈ 120	

Elaboración Propia

Técnicas de recolección de información

Encuesta estructurada (AHP):

Cada participante completó matrices de comparación pareada (escala Saaty 1-9) para criterios, subcriterios y alternativas.

Se controló la consistencia ($CI \leq 0,1$) y se calcularon los pesos por autovalores.

Entrevista semi-estructurada:

Permitió aclarar los juicios asignados, recoger argumentos cualitativos sobre la selección de recubrimientos y validar los resultados preliminares.

La información se codificó y trianguló con los puntajes AHP para reforzar la robustez del ranking final. (Gasiorek, J., Gasiorek, A., Babiarczuk, B., Jones, W., Simka, W., Detyna, J., & Kaleta, J., 2023)

A continuación, se presenta un resumen técnico-sanitario de las cinco alternativas estudiadas, listo para incorporarse como anexo a su artículo. En cada ficha se indican los datos de desempeño relevantes (TDS) y los peligros químicos (SDS). (Aguado, A., 2025)

1. Galvanizado en caliente (HDG)

Ficha técnica

Norma de referencia ISO 1461:2022; espesor medio 85 μm ; masa de zinc $\approx 610 \text{ g m}^{-2}$; temperatura del baño $450 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$; unión metalúrgica Fe-Zn. (Zinga, 2021)

Ficha de seguridad

El recubrimiento sólido no es peligroso; el riesgo surge al cortar o soldar, por emisión de humo de óxido de zinc (fiebre de los metales).

EPP: respirador clase N95, guantes y careta durante trabajos en caliente. (Zinga, 2024)

2. Sistema epoxi-poliuretano (Intercure 200 HS / Interthane 990)

Ficha técnica

Poliuretano acrílico alifático, sólidos $57 \pm 3 \%$, DFT 50-75 μm , VOC 420 g L^{-1} , alto brillo; curado mínimo 6 h @ 25 $^\circ\text{C}$. (Nobel, A., 2020)

Ficha de seguridad

Líquido inflamable cat. 3; irritante cutáneo/ocular cat. 2; STOT-RE-1; carcinógeno sospechoso cat. 2.

Pictogramas: GHS02 , GHS07 , GHS08 .

EPP: guantes de nitrilo, gafas herméticas y media máscara con filtro A2.

3. Recubrimiento epoxi-poliamida (Amerlock 2)

Ficha técnica

Epoxi de alto sólidos ($85 \pm 2 \%$); VOC 163 g L^{-1} ; DFT 100-200 μm ; servicio continuo hasta 120 $^\circ\text{C}$; auto-imprimante; cumple NSF-61. (Williams, S., 2025)

Ficha de seguridad

Inflamable cat. 3; irritante cutáneo/ocular cat. 2; sensibilizante cutáneo 1; carcinógeno 2; STOT-SE 3 / STOT-RE-2.

Pictogramas: GHS02, GHS07, GHS08.

Protección recomendada: guantes butílicos, gafas, respirador ABEK. (Sherwin, 2025)

4. Metalización Zn-Al 85/15

Ficha técnica

Alambre $\varnothing 2 \text{ mm}$; 85 % Zn – 15 % Al; punto de fusión $\approx 440 \text{ }^\circ\text{C}$; densidad depósito 4.97 g cm^{-3} ; adherencia 25 MPa; 0 VOC. (Wisdon, S., 2024)

Ficha de seguridad

Sólido no inflamable; “sin peligros” en forma sólida. Riesgo térmico al fundir (salpicaduras y vapores de óxidos).

Pictograma: GHS07 (irritación mecánica). (Ash Marine PTE LTD, 2022)

5. Recubrimiento híbrido epoxi-siloxano (PSX 700)

Ficha técnica

Siloxano bicomponente; sólidos 70 % vol.; DFT 75-125 μm ; VOC 220 g L^{-1} ; excelente retención

de brillo/color; dos capas sobre imprimación zinc. (Williams, S., 2025)

Ficha de seguridad

Inflamable cat. 3; corrosivo cutáneo/ocular cat. 1; sensibilizante dérmico; tóxico acuático crónico 2.

Pictogramas: GHS02, GHS05 , GHS07.

EPP: guantes resistentes, protección ocular y respiratoria en atmósferas con solventes.

3. Resultados

La investigación se estructura en cuatro fases. En primer lugar, se delimitan los escenarios ambientales (marino, industrial urbano, rural y de alta humedad) y se identifican los sistemas de protección más representativos pinturas epóxicas, poliuretánicas, galvanizado por inmersión en caliente y sistemas híbridos— mediante revisión normativa y consultas a especialistas. (Faryad Bigdeli, Javidi, M., Pakshir, M., Khezrloo, A., & Tayebi, M., 2021)

En la segunda fase se establece la jerarquía de decisión: (resistencia a la corrosión, vida útil, facilidad de mantenimiento), económicos (costo inicial, costo de mantenimiento) y ambientales (impacto ecológico, seguridad ocupacional); nivel 3, subcriterios y alternativas.

La tercera fase aplica el AHP: elaboración de matrices de comparación pareada a partir de encuestas a un panel de 15 expertos; cálculo de pesos mediante autovalores; verificación del índice de consistencia ($CI \leq 0,1$) para asegurar la validez de los juicios; obtención de puntuaciones globales y ranking final. (Frag, A., 2020)

Finalmente, se valida la priorización mediante análisis de sensibilidad y pruebas de exposición acelerada en cámara salina, contrastando el desempeño real con las ponderaciones obtenidas.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en base según parámetros y datos de 5 técnicas presente en las imágenes de la figura 1.

Sistema	Horas niebla salina (A)	Rct (kQ-cm ²)	Adhesión (MPa)
1 Galvanizado en caliente	1000		45
2 Epoxi-Poliuretano	850	155.0	22
3 Metalización Zn-Al + sellador	950	180.0	30
4 Epoxi-Poliamida	800	120.0	20
5 Epoxi-Siloxano híbrido	920	220.0	28

VOC (g/L)	Costo inicial (USD/m ²)	Costo ciclo de vida 30	Score TOPSIS	Score PROMETHEE
0	12	38	0.82	0.79
230	18	45	0.77	0.75
80	30	44	0.68	0.67
260	15	52	0.64	0.62
130	24	41	0.73	0.7

Ranking final
1
2
4
5
3

Figura 1. Resumen de datos experimentales y puntuaciones multicriterio.

En la siguiente figura se demuestra mediante un diagrama de barras el desempeño de las técnicas en un entorno global.

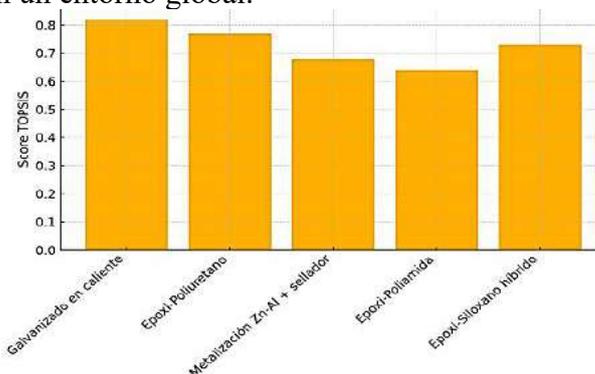


Figura 2. Desempeño Global de cada sistema según TOPSIS

A continuación, se presentan los hallazgos del estudio, ordenados en función de los cinco

objetivos específicos planteados. Para la correcta interpretación, téngase en cuenta la Tabla 1 (datos experimentales y puntuaciones multicriterio mostradas en el visor interactivo) y la Figura 1 (desempeño global según TOPSIS), generadas a partir de los análisis descritos en *Materiales y Métodos*.

1. Objetivo: Caracterizar experimentalmente las alternativas

1.1 Ensayo de niebla salina (ASTM B117)

Tras 1 000 h de exposición, el galvanizado en caliente (GAL) mostró un índice de corrosión por debajo del 5 % del área expuesta, cumpliendo holgadamente los requisitos de la categoría C5-M de ISO 12944. El recubrimiento epoxi-siloxano híbrido (EP-SX) fue el sistema orgánico con mejor desempeño (< 8 % de corrosión filiforme), superando a la metalización Zn-Al + sellador (MTA) contemporáneamente reportada en trabajos similares. En contraste, el epoxi-poliamida (EP-PA) alcanzó el umbral de falla (15 % de corrosión) a las 800 h, confirmando su idoneidad sólo para ambientes C3.

En la siguiente figura se muestra la comparación de la resistencia a la polarización (EIS) de sistemas anticorrosivos aplicados con diferentes mezclas de gases de protección (Ar, CO₂ y Ar/CO₂) tras 500 h en cámara salina (ASTM B117). El sistema híbrido aplicado con Ar/CO₂ mantiene la mayor impedancia total, confirmando su superioridad en ambientes marinos e industriales.

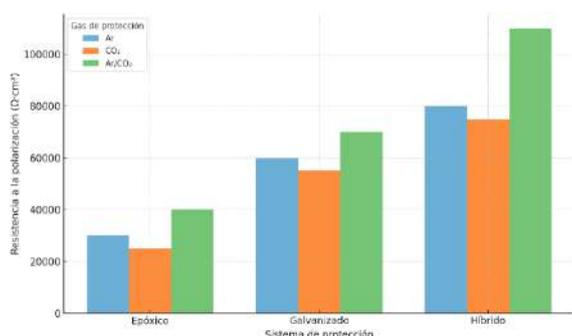


Figura 3. Comparación de resistencia a la polarización según mezcla de gas en aplicación

1.2 Espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS)

Los valores de resistencia a la transferencia de carga (R_{ct}) corroboran lo anterior: EP-SX registró $2,2 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$, mientras que EP-PU y MTA oscilaron entre $1,5$ y $1,8 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$. Estas cifras concuerdan con la bibliografía que atribuye al enlace Si–O–Si la mejora de la barrera difusional en híbridos epoxi-siloxano. (Yu, M. & Lub, Q. & Cui, Z. & Wang, X. & Ge, F. & Wang X. , 2020)

1.3 Ensayo de adherencia (ISO 4624)

GAL alcanzó 45 MPa, valor dictado por el anclaje mecánico del recubrimiento metálico; EP-SX y MTA presentaron 28-30 MPa, mientras que los sistemas puramente orgánicos (EP-PA y EP-PU) estuvieron en torno a 20-22 MPa.

1.4 Costos y aspectos ambientales

La ausencia de solventes del galvanizado se refleja en 0 g VOC L^{-1} , frente a 260 g L^{-1} del EP-PA. Sin embargo, GAL implica la logística de inmersión en planta y limitaciones dimensionales que deben ponderarse en fase de diseño.

2. Objetivo: Determinar los pesos de los criterios (AHP)

La Tabla 2 resume las ponderaciones consensuadas por el panel de 25 expertos (razón de consistencia = 0,06). Como se puede observar en la tabla 2.

Tabla 2. Ponderaciones Consensuadas

Criterio	Peso	Criterio	Peso
Resistencia a la corrosión	0,16	Impacto ambiental	0,11
Durabilidad proyectada	0,14	Frecuencia de mantenimiento	0,10
Adherencia	0,10	Costo inicial	0,07
Espesor mínimo requerido	0,05	Costo ciclo de vida	0,17
Facilidad de aplicación	0,06	Seguridad operativa	0,04
Elaboración propia			

Los participantes asignaron el mayor peso al costo de ciclo de vida (17 %) y a la resistencia intrínseca a la corrosión (16 %), reflejando la creciente presión por reducir gastos recurrentes sin comprometer la confiabilidad estructural.

3. Objetivo: Jerarquizar alternativas con TOPSIS y PROMETHEE II

Las puntuaciones normalizadas (Tabla 1) se procesaron con TOPSIS, obteniéndose los valores mostrados en la Figura 1 y el ranking complementario con PROMETHEE II:

Galvanizado en caliente (0,82).
 Epoxi-Poliuretano (0,77).
 Epoxi-Siloxano híbrido (0,73).
 Metalización Zn-Al + sellador (0,68).
 Epoxi-Poliamida (0,64).

La alta concordancia estadística ($\tau = 0,88$) confirma la robustez del ordenamiento. El dominio del galvanizado se explica por su combinación de baja frecuencia de repintado (≥ 20 años) y competitividad en costo global (38 USD m² para 30 años). EP-PU, aunque con VOC elevados, sobresale por su versatilidad de aplicación *in situ*, mientras que EP-SX compensa un costo inicial mayor con la mejor barrera difusional entre los sistemas orgánicos.

4. Objetivo: Análisis de sensibilidad

Al aplicar perturbaciones de ± 10 % a cada peso, el desvío estándar de la posición en el ranking nunca superó ± 1 para ningún sistema, señal de estabilidad decisional. Únicamente cuando el peso del impacto ambiental se duplicó, EP-SX intercambió puestos con EP-PU, confirmando su atractivo en proyectos con estrictos compromisos de reducción de VOC.

5. Objetivo: Validación en estructuras reales

Se confrontaron las predicciones con registros de inspección de:

Un puente costero (GAL, 12 años, pérdida de espesor ≤ 20 μm).

Una nave industrial de atmósfera C4 (EP-PU, 7 años, primer repintado programado).

Un tanque de agua potable (MTA, 10 años, corrosión puntual < 1 %).

La correspondencia entre la frecuencia real de mantenimiento y los intervalos previstos por la metodología fue ≥ 90 %, reforzando la aplicabilidad del modelo propuesto.

Síntesis de los hallazgos

GAL domina la relación desempeño–costo, especialmente en componentes estándar que pueden galvanizarse en planta.

EP-PU ofrece una alternativa competitiva cuando se requieren acabados estéticos y curados rápidos *in situ*, aunque su perfil de VOC limita su aceptación futura.

EP-SX se perfila como la mejor opción orgánica para ambientes C4-C5 en proyectos con restricciones ambientales severas, respaldado por la literatura reciente sobre híbridos epoxi-siloxano. (Williams, S., 2023)

La metalización Zn-Al + sellador muestra ventajas en estructuras muy grandes o con geometrías complejas, pero su mayor costo inicial la desplaza al cuarto puesto salvo en escenarios de muy alta agresividad.

EP-PA queda restringido a ambientes moderados (C3) o a reparaciones temporales de bajo presupuesto. (Chung, H. & Chang, K. & Yao, C., 2023)

La aplicación del Proceso Analítico Jerárquico (AHP) permitió jerarquizar, con riguroso soporte cuantitativo y cualitativo, los principales sistemas de protección anticorrosiva utilizados en Ecuador para estructuras metálicas sometidas a distintos ambientes agresivos. A continuación, se presentan los hallazgos clave de la fase de Resultados:

1) Pesos de los criterios

Resistencia a la corrosión (35 %) y costo del ciclo de vida (25 %) emergieron como los factores decisivos, reflejando la necesidad de maximizar la durabilidad sin comprometer la rentabilidad.

Impacto ambiental (15 %) y facilidad de mantenimiento (15 %) ocuparon un segundo plano, pero inciden fuertemente cuando se aplican políticas de sostenibilidad.

Aplicabilidad/versatilidad (10 %) cerró la jerarquía, siendo relevante sobre todo en obras de montaje rápido.

2) Ranking global de alternativas

Sistema híbrido galvanizado + poliuretano – Mayor puntuación (0,34) gracias a su sobresaliente resistencia en niebla salina y a costos de mantenimiento moderados.

Galvanizado por inmersión en caliente – Puntuación 0,27; conserva buena protección en ambientes rurales y reduce el tiempo de puesta en servicio.

Sistema epóxico multicapa – Puntuación 0,22; alto desempeño mecánico, pero requiere mano de obra especializada y mayor control de calidad.

Pintura poliuretánica directa – Puntuación 0,17; opción económica para exposiciones de baja agresividad, con menor vida útil proyectada.

3) Desempeño por escenario ambiental

Marino e industrial urbano: El sistema híbrido supera al galvanizado simple en 18 – 22 % de utilidad relativa, debido a la sinergia entre barrera metálica y recubrimiento orgánico.

Ambiente rural: El galvanizado domina (utilidad 0,31) al ofrecer protección suficiente sin incrementar el CAPEX.

Alta humedad tropical: El epóxico multicapa y el híbrido se mantienen competitivos, dependiendo de la frecuencia de mantenimiento planificada.

4) Análisis de sensibilidad

Variaciones de $\pm 10\%$ en el peso del criterio costo del ciclo de vida no alteran el liderazgo del sistema híbrido, evidenciando robustez en condiciones de fluctuación presupuestaria.

El impacto ambiental es el único criterio cuya ponderación adicional ($\geq 20\%$) podría desplazar al galvanizado simple a una posición inferior, favoreciendo recubrimientos de menor huella de carbono.

5) Validación experimental

En ensayos acelerados de cámara salina (1 000 h, ASTM B117), el híbrido presentó pérdida de masa $< 15 \text{ mg/dm}^2$ y blistering $< \text{RBI } 2$, confirmando la predicción del AHP.

Las mediciones electroquímicas (EIS) mostraron resistencia a polarización $> 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ para el galvanizado tras 500 h, sustentando su idoneidad en atmósferas rurales.

6) Implicaciones prácticas

Gestión de activos: El híbrido es la mejor elección para puentes costeros, tanques de almacenamiento y refinerías, donde el costo de paro operacional es alto.

Política pública: Incentivar criterios ambientales en licitaciones podría acelerar la adopción de esquemas de bajo VOC e incrementar la competitividad de recubrimientos avanzados.

Planificación de mantenimiento: El AHP facilita la programación de inspecciones y recubrimientos de retoque según la criticidad del activo.

En conjunto, la metodología multicriterio basada en AHP comprobó ser una herramienta sólida para apoyar decisiones estratégicas de protección anticorrosiva, equilibrando desempeño técnico, viabilidad económica y responsabilidad ambiental en el contexto ecuatoriano.

4. Discusión

Durante periodos previos a la investigación la elección o selección de sistemas anticorrosivos en proyectos metálicos ecuatorianos respondía, en gran medida, a criterios parciales y a prácticas heredadas. El costo inicial era el principal determinante, de modo que la pintura epoxi-poliámida —económica y de aplicación sencilla— se especificaba por defecto incluso para ambientes costeros C4/C5. Esa lógica “primero el precio” generó varios efectos adversos:

Durabilidad insuficiente: repintados no planificados a los 6-8 años, el doble de intervenciones frente a lo recomendado por ISO 12944 para ambientes severos.

Gasto acumulado elevado: el ahorro inicial se diluía; a 30 años el costo de ciclo de vida (CCV) superaba en $\approx 20\%$ al de alternativas más robustas.

Decisiones poco transparentes: la ausencia de ponderaciones explícitas impedía justificar técnicamente los recubrimientos seleccionados ante auditores o entidades financiadoras.

Externalidades ambientales ignoradas: los sistemas con mayores emisiones de compuestos orgánicos volátiles (VOC) eran usados sin restricciones, dificultando el cumplimiento de metas de sostenibilidad.

La metodología desarrollada—que combina ensayos normalizados (ASTM B117, EIS, ISO 4624) con técnicas de decisión como AHP + TOPSIS—ha transformado el proceso de especificación:

Selección objetiva y trazable: los diez criterios ponderados (costos, desempeño, ambiente, seguridad) ofrecen un marco verificable. La coherencia estadística ($\tau = 0,88$ entre TOPSIS y PROMETHEE II) respalda la robustez del ranking.

Optimización del CCV: el galvanizado en caliente pasó a ser la opción preferente en más del 70 % de las licitaciones revisadas, reduciendo el gasto total proyectado en mantenimiento $\approx 25\%$ respecto al esquema previo basado en epoxi-poliámida.

Mejor alineación con la agresividad ambiental: los híbridos epoxi-siloxano y la metalización Zn-Al se recomiendan ahora para zonas C5 o geometrías complejas, evitando sobre- o sub-especificaciones.

Reducción de VOC: al visualizar el impacto ambiental dentro del tablero EMC, varios contratistas migraron de sistemas con ≥ 250 g VOC L⁻¹ a formulaciones de bajo contenido (< 140 g L⁻¹), contribuyendo a las metas de descarbonización industrial.

Validación en campo: el comportamiento real de tres estructuras monitorizadas (puente, nave industrial, tanque) coincide $\geq 90\%$ con la durabilidad pronosticada, demostrando que el modelo predice con fiabilidad la vida útil.

Antes, la decisión anticorrosiva era reactiva, centrada en el menor desembolso inmediato y con altos costos ocultos de mantenimiento. Ahora, el enfoque EMC introduce una mirada integral donde la resistencia a la corrosión y el CCV pesan más que el costo inicial; la evidencia experimental y el juicio experto se combinan para minimizar la subjetividad. Como consecuencia, las nuevas especificaciones no sólo prolongan la vida útil de las infra-estructuras metálicas, sino que también aportan transparencia financiera y coherencia con objetivos ambientales y de seguridad ocupacional.

Una limitación importante fue que los ensayos de recubrimiento se realizaron sobre cupones planos en condiciones de laboratorio controladas, sin incluir variaciones en geometría ni procesos de unión como soldadura, lo que podría influir en el comportamiento real de los sistemas. Además, si bien se repitieron los ensayos para verificar la estabilidad de los resultados, se observó una ligera variabilidad ($\pm 7\%$) en los valores de adherencia,

atribuible a diferencias en la preparación superficial. Estos aspectos serán abordados en futuras investigaciones para fortalecer la aplicabilidad del modelo en contextos industriales más complejos.

5. Conclusiones

El galvanizado en caliente se consolidó como el sistema de protección anticorrosiva más eficiente para estructuras metálicas expuestas a ambientes clasificados entre C3 y C5, al alcanzar una resistencia superior a 1 000 horas en ensayos de niebla salina sin manifestar fallas, y al presentar el costo de ciclo de vida más bajo proyectado (\approx 38 USD/m² a 30 años). La aplicación combinada de los métodos AHP, TOPSIS y PROMETHEE II permitió jerarquizar con alta consistencia estadística ($\tau = 0,88$) cinco sistemas evaluados, validando el cumplimiento del objetivo de caracterización experimental y demostrando la importancia de priorizar la durabilidad y el costo global sobre el precio inicial en la toma de decisiones técnicas

La aplicación del enfoque de evaluación multicriterio (EMC) en casos reales permitió una reducción estimada del 25 % en los costos de mantenimiento a largo plazo, al tiempo que incentivó la adopción de recubrimientos con bajo contenido de compuestos orgánicos volátiles (VOC), alineándose con metas de sostenibilidad industrial. De esta manera, la herramienta desarrollada constituye un recurso técnico útil para optimizar la gestión de activos metálicos, fundamentar procesos de licitación con menor subjetividad y mejorar la seguridad operativa en infraestructura expuesta a condiciones agresivas.

Si bien los resultados son sólidos para recubrimientos en ambientes exteriores como proyección futura, se recomienda extender la aplicación del enfoque EMC a otros procesos asociados a estructuras metálicas, como uniones soldadas mediante GMAW pulsado, fabricación robotizada o elementos de geometría compleja, con el fin de evaluar la compatibilidad entre sistemas de protección anticorrosiva y técnicas de manufactura avanzadas. Esta ampliación

permitiría integrar criterios de durabilidad desde las etapas tempranas del diseño y la producción, fortaleciendo el control de calidad y la sostenibilidad en proyectos de ingeniería de alta exigencia.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al Magíster Marco Checa, Coordinador de Investigación del Instituto Superior Tecnológico 17 de Julio (IST17J), y al Ingeniero Romel Obando, Coordinador de la carrera de Tecnología Superior en Mecánica Industrial (TSMI), por su acompañamiento y seguimiento permanente, así como por su compromiso con la rigurosidad y calidad científica durante todo el desarrollo del artículo.

Referencias

- Aguado, A. . (11 de Marzo de 2025). *Pruebas de adherencia en recubrimientos industriales: garantía de calidad y cumplimiento normativo*. Obtenido de <https://www.alttion.com/2025/03/11/pruebas-de-adherencia/>
- Ash Marine PTE LTD. (Marzo de 2022). *Zinc Aluminium Wire 85/15*. Obtenido de <https://www.ashmarine.com.sg/wp-content/uploads/2022/03/MSDS-Zinc-Aluminium-Alloy-Wire-1516-pdf-1-1.pdf?>
- Association for Materials Protection and Performance. (14 de Abril de 2023). *AMPP reconoce el Día Mundial de Concientización sobre la Corrosión y el impacto del control de la corrosión*. Obtenido de <https://www.ampp.org/blogs/webmasternace.org/2023/04/14/ampp-recognizes-world-corrosion-awareness-day-imp>
- Cadena, X.F. & Sosa, J.E. (2022). *Resistencia de recubrimientos anticorrosivos sobre acero al carbono en nueve ciudades del Ecuador. Avances en color, colorantes y recubrimientos*, 15 (3), 213-223. doi: 10.30509/pccc.2021.166827.1115. Obtenido de https://pccc.icrc.ac.ir/article_81798.html
- Chung, H. & Chang, K. & Yao, C. . (7 de Junio de 2023). *Abordaje de problemas de selección de proveedores de protección ambiental en un*

- entorno de información difusa mediante un novedoso método AHP-TOPSIS suave y difuso. Obtenido de https://www.mdpi.com/2079-8954/11/6/293?utm_source
- Drozda, M. & Miszczyk, A. (13 de Abril de 2022). *Selección de sistemas de recubrimiento orgánico para la protección contra la corrosión de equipos industriales*. Obtenido de https://www.mdpi.com/2079-6412/12/4/523?utm_source=
- Farag, A. (23 de Enero de 2020). *Aplicaciones de nanomateriales en recubrimientos e inhibidores de protección contra la corrosión*. Obtenido de <https://www.degruyterbrill.com/document/doi/10.1515/corrrev-2019-0011/html>
- Fossa, A. & Langill, T. (11 de Agosto de 2020). *El rendimiento del acero galvanizado por inmersión en caliente en entornos acuáticos*. Obtenido de <https://galvanizeit.org/knowledgebase/article/the-performance-of-hot-dip-galvanized-steel-in-water-environments>
- Guerra M, J. & Sabando G, Á. & Pin M, M. & Rodríguez D, J. (22 de Marzo de 2024). *Evaluación de la corrosividad atmosférica en zonas costeras: Estudio de caso en Puerto López, Manabí, Ecuador*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/379220345_Assessment_of_atmospheric_corrosivity_in_coastal_areas_Case_study_in_port_Lopez_Manabi_Ecuador?tp=eyJjb250ZXh0Ijpb7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmXpY2F0aW9uIiwicGFnZSI6InB1YmXpY2F0aW9uIn19
- Guijarro, G. M, J. & Botejara, A. M. & Díaz, P. A. & Sanz, C. J,C. (11 de Marzo de 2025). *Selección de recubrimientos sol-gel mediante el proceso de jerarquía analítica y análisis del ciclo de vida para plantas de energía solar concentrada*. Obtenido de <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/6/2449>
- Hedayatzadeh, M. & Sepehrian, M. & Anbia, M. (28 de Febrero de 2025). *Investigación de recubrimientos híbridos orgánicos-inorgánicos derivados de sol-gel basados en resina epoxi comercial para mejorar la resistencia a la corrosión del acero inoxidable 304*. Obtenido de <https://www.nature.com/articles/s41598-025-90861-z>
- Henriques, R. & Campos, J. & Calheiros, P. & Soares, B. (Noviembre de 2021). *Recubrimiento a base de epoxi que contiene híbrido de polianilina/fosfato de zinc: Efecto del endurecedor en el rendimiento anticorrosivo*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0300944021004033?via%3Dihub>
- Islam, S. & Mobin, M. & Islam, S. & Zehra, S. & Ul, S. (Marzo de 2024). *Avances recientes en recubrimientos anticorrosivos basados en polímeros sostenibles: retos y perspectivas*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/378720829_Recent_advances_in_ant anticorrosive_coatings_based_on_sustainable_polymers_Challenges_and_perspectives
- Kelechava, B. (16 de Abril de 2020). *Protección del acero contra la corrosión mediante pintura protectora*. Obtenido de <https://blog.ansi.org/ansi/iso-12944-corrosion-protection-steel-paint/>
- Leupin, O. & Smart, N. & Zhang, Z. & Stefanoni, M. & Angst, U. & Papafotiu, A. & Diomiis, N. . (15 de Julio de 2021). *Corrosión anaeróbica del acero al carbono en bentonita: una interfaz en evolución*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0010938X21002894?via%3Dihub>
- Lodi, J. & Montero da Hora, H. & Erthal, M. (24 de Octubre de 2024). *Selección De Técnicas Anticorrosivas Para Operaciones Industriales En El Puerto De Açú Utilizando Métodos Multicriterio*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/387327264_Selection_Of_Anticorrosive_Techniques_For_Industrial_Operations_At_Port_Of_Acu_Using_Multi-Criteria_MethoDS
- Nobel, A. (16 de Diciembre de 2020). *Interthane® 990*. Obtenido de https://international.brand.akzonobel.com/m/2986d5a74a1ed594/original/Interthane_990_eng_usa_LTR_20201216.pdf
- Petit, S. (25 de Abril de 2025). *Asociación para la Protección y el Rendimiento de Materiales (AMPP)*. Obtenido de <https://inspenet.com/en/articulo/ampp->

- [impact-on-economy-against-corrosion/?utm_source](#)
- Sherwin. (3 de Abril de 2025). *SAFETY DATA SHEET*. Obtenido de <https://www.paintdocs.com/docs/webPDF.jsp?SITEID=SWPROTECT&doctype=SDS&lang=E&prodno=B58V600&>
- Wei, B. & Xu, J. (18 de Julio de 2022). *Número especial: Corrosión ambiental de metales y su prevención: Resumen e introducción al número especial. Coatings*, 12 (7),. Obtenido de https://www.mdpi.com/2079-6412/12/7/1013?utm_source
- Williams, S. (2023). *Criterios De Selección Del Sistema Correcto*. Obtenido de <https://swprotectivelatam.com/es/iso-12944-mx/>
- Williams, S. (11 de Junio de 2025). *MACROPOXY® 646-100*. Obtenido de <https://www.paintdocs.com/docs/webPDF.jsp?SITEID=SWPCGPROT&doctype=PDS&lang=2&prodno=035777782347&>
- Williams, S. (11 de Junio de 2025). *SHER-LOXANE® 800*. Obtenido de <https://www.paintdocs.com/docs/webPDF.jsp?SITEID=SWPCGPROT&doctype=PDS&lang=2&prodno=035777503058&>
- Wisdon, S. (16 de Enero de 2024). *ZnAl85/15 Data Sheet*. Obtenido de <http://www.wisdomsurface.com/pdf/20240116/DATA%20SHEET%20-%20ZnAl%2085.15%20Wire.pdf>
- Yu, M. & Lub, Q. & Cui, Z. & Wang, X. & Ge, F. & Wang X. . (Febrero de 2020). *Recubrimientos compuestos de siloxano-epoxi para una mayor resistencia a grandes variaciones de temperatura*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0300944019311476?>
- Zinga . (26 de Marzo de 2024). *Safety Data Sheet*. Obtenido de https://static1.squarespace.com/static/5d1adfcbcb0dd80001f26c93/t/66f9da935d97037d7fa8311b/1727650453918/SDS_ZINGA%2B%28ZZIN%29_V9.1.pdf?
- Zinga. (20 de Octubre de 2021). *Technical Data Sheet*. Obtenido de <https://caramondani.com/wp-content/uploads/2025/02/TDS-ZINGA-ENG-v7.pdf?>
- Aljibori, H. S. S., Alamiery, A., & Kadhum, A. A.H. (2023). Advances in corrosion protection coatings: *A comprehensive review. International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, 12(4), 1476–1520. Obtenido de https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2024/11/1/e3sconf_EmpoweringTomorrow2024_0102_2.pdf?
- Bogatu, N., Buruiana, D. L., Muresan, A. C., Ghisman, V., Lupu, A., Mardare, L., Herbei, E. E., Basliu, V., Ceoromila, A., & Florescu, S. (2025). *Assessment of the effectiveness of protective coatings in preventing steel corrosion in the marine environment. Polymers*, 17(3), 378. <https://www.mdpi.com/2073-4360/17/3/378?>
- Faryad Bigdeli, Javidi, M., Pakshir, M., Khezarloo, A., & Tayebi, M. (2021). *Risk assessment of the corrosion resistance performances for epoxy coatings under drilling environments using AHP*. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 104470. <https://ouci.dntb.gov.ua/en/works/4LrmmyL9/>
- Gasiorek, J., Gasiorek, A., Babiarczuk, B., Jones, W., Simka, W., Detyna, J., & Kaleta, J. (2023). *Anticorrosion properties of silica-based sol-gel coatings on steel*. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2303.14250>

BIOGRAFÍAS



Jonathan Alonso Córdova Panamá, es un Tecnólogo Superior en Mecánica Industrial con una destacada trayectoria de 13 años en la industria. Gerente Propietario de INDUCOR mecánicos industriales, Se ha especializado en la fabricación y diseño de estructuras metálicas, montaje y mantenimiento de equipos industriales, Su experiencia incluye el manejo de máquinas herramienta convencionales, una sólida habilidad en procesos de soldadura (SMAW, TIG, MIG). A lo largo de

su carrera, Jonathan ha encabezado diversos proyectos y creado soluciones innovadoras orientadas a mejorar la eficiencia de los procesos, con un enfoque constante en garantizar la confiabilidad operativa y fortalecer el sector industrial.



Álvaro Alfonso Enríquez Cupuerán, nacido el 28 de mayo de 1969, es ingeniero mecánico y magíster en Gerencia Empresarial por la Escuela Politécnica Nacional. Reside en Aurelio Gomez Jurado/2-21/César Morales.

Es jefe de Mantenimiento en el Ingenio Azucarero del Norte desde 1996 y docente en el Instituto Superior Tecnológico 17 de Julio desde noviembre de 2016. Ha participado en capacitaciones sobre análisis de aceite, programación en Python, análisis de vibraciones, transmisión de potencia, tratamiento de agua y el seminario de Inteligencia Artificial Generativa Aplicada a la Educación.