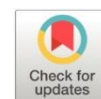


Aplicación de sondeos eléctricos como ensayos no destructivos para la evaluación de corrosión en elementos de acero

Electrical survey techniques for corrosion assessment in steel structures: case studies, equipment analysis, and practical applications

- ¹ Marlon Ariel Iñamagua Cuenca  <https://orcid.org/0009-0006-1443-7395>
Universidad Católica de Cuenca (UCACUE). Cuenca, Ecuador.
Maestría en Ingeniería Civil
mainamaguac35@est.ucacue.edu.ec
- ² Juan Sebastián Maldonado Noboa  <https://orcid.org/0000-0001-5329-2201>
Universidad Católica de Cuenca (UCACUE). Cuenca, Ecuador.
jmaldonadon@ucacue.edu.ec



Artículo de Investigación Científica y Tecnológica

Enviado: 10/06/2026

Revisado: 09/07/2026

Aceptado: 28/08/2026

Publicado: 01/10/2026

DOI: <https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v9i4.3764>

Cítese:

Iñamagua Cuenca, M. A., & Maldonado Noboa, J. S. (2026). Aplicación de sondeos eléctricos como ensayos no destructivos para la evaluación de corrosión en elementos de acero. ConcienciaDigital, 9(4), 6-26.

<https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v9i4.3764>



CONCIENCIA DIGITAL, es una revista multidisciplinar, **trimestral**, que se publicará en soporte electrónico tiene como **misión** contribuir a la formación de profesionales competentes con visión humanística y crítica que sean capaces de exponer sus resultados investigativos y científicos en la misma medida que se promueva mediante su intervención cambios positivos en la sociedad. <https://concienciadigital.org>
La revista es editada por la Editorial Ciencia Digital (Editorial de prestigio registrada en la Cámara Ecuatoriana de Libro con No de Afiliación 663) www.celibro.org.ec



Esta revista está protegida bajo una licencia Creative Commons en la 4.0 International. Copia de la licencia: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



Palabras claves:

Corrosión,
resistividad
eléctrica,
sondeos eléctricos,
diagnóstico
estructural,
mantenimiento
predictivo.

Keywords:

Corrosion,
electrical
resistivity,
electrical
sounding,
structural
diagnosis,

Resumen

Introducción: la corrosión de los componentes estructurales de acero es una de las patologías clave a nivel de ingeniería civil, ya que representa serios riesgos para la resistencia y vida de las infraestructuras. **Objetivos:** esta investigación tiene como objetivo analizar la efectividad práctica de los sondeos eléctricos como técnica no destructiva para el diagnóstico de corrosión de estructuras metálicas, especialmente en entornos donde el sistema se vuelve altamente susceptible, como puentes, tanques, tuberías y elementos de concreto reforzado. **Metodología:** el estudio se realizó a través de una revisión sistemática de estudios de caso y comparando datos experimentales con diferentes configuraciones de sondeo eléctrico (Wenner, Schlumberger, dipolo-dipolo). **Resultados:** se llevó a cabo un análisis de resistividad eléctrica por variables ambientales (humedad, salinidad, contenido de cloruros), estadísticas descriptivas y análisis correlacional. El estudio encontró que el 85% de los casos, con resistividad $<100 \Omega \cdot m$, presentaban condiciones que probablemente eran de corrosión activa. De manera similar, se observó una correlación inversa ($r = -0.73$) entre la resistividad y el deterioro estructural. Los resultados indicaron que la precisión utilizada era mejor en suelos homogéneos, aunque también se demostró que fallaba en entornos heterogéneos. **Conclusiones:** se sugiere que los sondeos eléctricos pueden ser un instrumento efectivo para establecer áreas de riesgo, sin embargo, si se combinan con técnicas como el potencial de media celda o la espectroscopía de impedancia. Este método permite el desarrollo de planes de mantenimiento previstos, y esta optimización de recursos puede mejorar y prolongar la vida de la infraestructura. **Área de estudio general:** Ingeniería Civil. **Área de estudio específica:** Estructura metálica. **Tipo de artículo:** revisión bibliográfica.

Abstract

Introduction: the corrosion of steel structural components is one of the key pathologies at the level of civil engineering since it represents serious risks to the resistance and life of infrastructures. **Objectives:** this research aims to investigate the practical effectiveness of electrical surveys as a non-destructive technique for the diagnosis of corrosion of metal structures, especially in environments where the system becomes highly susceptible, such as bridges, tanks, pipes, and reinforced concrete elements.

predictive
maintenance.

Methodology: the study was conducted through a systematic review of case studies and comparing experimental data with different survey configurations (Wenner, Schlumberger, dipole-dipole). **Results:** an analysis of electrical resistivity was conducted by environmental variables (humidity, salinity, chloride content), descriptive statistics and correlational analysis. The study found that 85% of the cases, with resistivity $<100 \Omega \cdot m$, presented conditions that were likely to be active corrosion. Similarly, we found an inverse correlation ($r = -0.73$) between resistivity and structural deterioration. The results indicated that the accuracy used was better in homogeneous soils, although it was also shown to fail in heterogeneous environments. **Conclusions:** it is suggested that electrical surveys can be an effective instrument to establish risk areas, however, if they are combined with techniques such as half-cell potential or impedance spectroscopy. This method allows for the development of planned maintenance plans, and this optimization of resources can improve and extend the life of the infrastructure. **General area of study:** Civil Engineering. **Specific area of study:** Metal structure. **Type of article:** bibliographic review.

1. Introducción

La corrosión de los componentes estructurales de acero es una de las patologías clave en ingeniería civil, ya que representa riesgos para la resistencia y vida útil de las infraestructuras. Este fenómeno, de naturaleza electroquímica, se produce por la interacción del acero con agentes ambientales como oxígeno, humedad, sales y cloruros, lo que desencadena procesos de oxidación y deterioro progresivo de sus propiedades físicas y mecánicas (Adeoti et al., 2018; Advancing Standards Transforming Markets [ASTM], 2025; Salazar-Jiménez, 2015).

El problema se agrava para los sistemas expuestos a climas variables, atmósferas agresivas o suelos ricos en cloruros y sulfatos. En consecuencia, cuando la corrosión está presente, pueden aparecer grietas, se puede perder la adhesión con el concreto, la capacidad de carga se reduce con el tiempo y, en casos extremos, provocará el colapso estructural total.

A lo largo de la historia, se ha demostrado que los efectos de no detectar o controlar oportunamente la corrosión pueden ser severos para la seguridad estructural. Casos de falla y colapso de estructuras metálicas, como los documentados en torno al puente Silver Bridge y otros eventos estructurales, muestran la importancia de fortalecer los sistemas

de inspección, monitoreo y mantenimiento preventivo (Baylón, 2020; Hernandez, 2021). Además, los estudios indican que los costos asociados a la corrosión pueden representar alrededor del 3,5% del Producto Interno Bruto (PIB) de un país, aunque una parte importante de estos costos puede reducirse mediante prevención y monitoreo adecuado (De Carufel, 2023).

Dentro de este contexto, es necesario implementar tecnologías que permitan la detección temprana de la corrosión y de su progresión. Por ello, los ensayos no destructivos de materiales (END/NDT) se han consolidado como procedimientos útiles para evaluar el estado de los materiales sin comprometer su integridad ni funcionalidad, ya que permiten identificar defectos, caracterizar condiciones internas o superficiales y orientar decisiones de mantenimiento sin recurrir a intervenciones invasivas (hqts.com, 2022; safetyculture.com, 2026).

Tales técnicas facilitan la identificación de defectos internos o superficiales, la predicción del comportamiento estructural futuro y la optimización de los planes de mantenimiento. Dentro del conjunto de metodologías NDT disponibles, los métodos eléctricos, incluidos los sondeos eléctricos, son relevantes por su capacidad para generar información medible sobre el estado del acero y de su entorno inmediato. En geotecnia, los sondeos eléctricos se han aplicado tradicionalmente para caracterizar capas subterráneas mediante la evaluación de la resistividad eléctrica (Ibarra-Castaneda et al., 2013; Chiriboga-Chiriboga et al., 2022).

Sin embargo, su uso se ha extendido con éxito al estudio de materiales de construcción, particularmente en el análisis de concreto reforzado y estructuras metálicas. El procedimiento se basa en la inyección controlada de corriente eléctrica entre dos electrodos y en la medición de la caída de voltaje entre electrodos de potencial. Con estos datos se calcula la resistividad del medio, parámetro estrechamente relacionado con la presencia de humedad, sales, cloruros, dióxido de carbono y otros agentes que inciden en el riesgo de corrosión del acero de refuerzo. Una ventaja de los sondeos eléctricos es su carácter no invasivo y su capacidad para obtener perfiles de resistividad asociados con la profundidad o con la distribución espacial del deterioro.

Estos datos son clave para predecir ubicaciones de alto riesgo de corrosión y determinar medidas correctivas o preventivas. Los sondeos eléctricos son herramientas valiosas para evaluar las propiedades del sistema acero-concreto o acero-suelo mediante la interpretación de datos derivados de mediciones eléctricas. Entre los parámetros más relevantes se encuentran el gradiente de potencial eléctrico, la resistividad eléctrica del medio y las corrientes inducidas, los cuales permiten inferir actividad electroquímica, capacidad del medio para conducir corriente y posibles defectos superficiales o subterráneos. Para asegurar la precisión de estos hallazgos se requiere el uso de equipos especializados y la aplicación de estándares técnicos establecidos por ASTM, ISO y NACE.

No obstante, sigue siendo muy desafiante realizar sondeos eléctricos para probar la corrosión de estructuras metálicas. Uno de ellos es el uso de materiales apropiados y la disponibilidad de equipos en pruebas de campo, particularmente en contextos de bajos recursos. Otro desafío es la interpretabilidad de los resultados, ya que la resistividad eléctrica puede variar por una variedad de influencias, por ejemplo, humedad, temperatura, salinidad, heterogeneidad del medio, etc., lo que requiere la capacitación del personal y la experiencia técnica, para prevenir resultados erróneos.

El propósito de este estudio es investigar el potencial de los sondeos eléctricos como método de inspección no destructiva para evaluar la corrosión en elementos de acero. Con este fin, se presentan las principales técnicas empleadas, las bases teóricas, las regulaciones aplicables y los casos documentados en obras de infraestructura. El objetivo es establecer la viabilidad, precisión y restricciones de este método, así como su posible incorporación en estándares de inspección estructural y en prácticas de mantenimiento utilizadas por comunidades académicas y profesionales de la ingeniería civil.

2. Metodología

La presente investigación se desarrolló mediante una revisión bibliográfica de la literatura científica, con enfoque cualitativo-comparativo, orientada a evaluar la efectividad de los sondeos eléctricos como técnica no destructiva para el diagnóstico de corrosión en estructuras metálicas y de concreto reforzado.

2.1. Estrategia de búsqueda

Esta es una revisión bibliográfica que identifica y analiza las experiencias documentadas relacionadas con la aplicación de sondeos eléctricos como pruebas no destructivas (NDT) en la evaluación de la corrosión en elementos estructurales de acero. Mientras que las metodologías cuantitativas se centran en medir la eficacia de las tecnologías existentes, este enfoque favorece la investigación de estudios técnico-aplicados para aprender más sobre cómo se despliegan las tecnologías en la práctica en infraestructura.

La estrategia de búsqueda bibliográfica se estableció del 20 al 25 de abril de 2025 en cinco bases de datos académicas identificadas por su relevancia temática y estatus reconocido en ciencias aplicadas: *Scopus*, *Web of Science*, *IEEE Xplore*, *ScienceDirect* y *Google Scholar*. Esto permite el acceso oportuno a todas las fuentes revisadas por pares de literatura científica sobre pruebas de materiales y estructuras metálicas, así como métodos de monitoreo no invasivos. También se utilizaron términos clave en inglés y español, y una secuencia bien organizada de operadores booleanos, con términos como “*electrical resistivity*”, “*electrical sounding*”, “*steel corrosion*”, “*reinforced concrete corrosion*”, “*non-destructive testing*”, “*case study*” y “*technical application*”. Los estudios citados en artículos apropiados fueron identificados con la técnica de seguimiento de referencias hacia atrás (snowballing), ampliando así la cobertura de la búsqueda.

2.2. Criterios de inclusión y exclusión

Con el objetivo de asegurar la pertinencia técnica y la calidad metodológica de los estudios considerados, se establecieron criterios de inclusión y exclusión específicos como se puede ver en la **Tabla 1**.

Tabla 1

Criterios de inclusión y exclusión aplicados en la revisión narrativa sistematizada

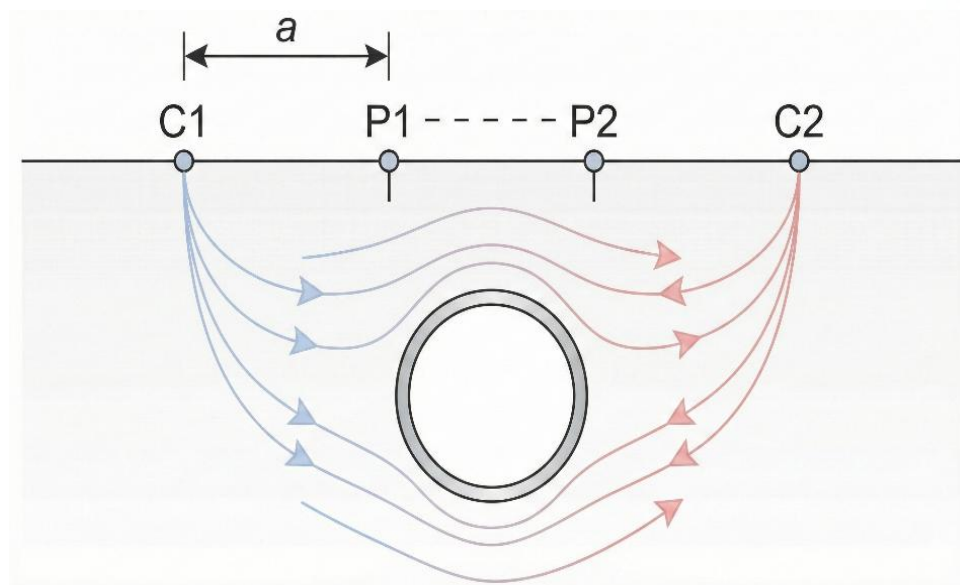
Criterios de inclusión	Criterios de exclusión
Artículos publicados entre 2013 y 2024	• Estudios anteriores a 2013
Estudios empíricos con aplicación de técnicas de sondeo eléctrico	• Simulaciones o modelos sin validación experimental
Revisión por pares	• Documentos sin arbitraje: informes técnicos, blogs, presentaciones o capítulos no académicos
Disponibles en texto completo	• Publicaciones sin acceso completo o con información metodológica insuficiente
Aplicación en estructuras metálicas (tuberías, concreto armado, puentes, tanques, etc.)	• Evaluaciones de otros materiales o aplicaciones no estructurales
Descripción clara del procedimiento técnico.	• Estudios sin enfoque técnico claro o sin uso principal de métodos eléctricos para evaluación de corrosión

2.3. Procedimiento general de aplicación de los sondeos eléctricos

En términos operativos, la aplicación de sondeos eléctricos para la evaluación de corrosión en estructuras metálicas consiste en inyectar una corriente de baja intensidad en el medio (suelo o concreto) y medir la diferencia de potencial generada en la superficie. En el caso del método de cuatro electrodos tipo Wenner, se disponen cuatro puntas conductoras alineadas sobre el terreno o sobre el recubrimiento de concreto, separadas por una distancia constante a . Los electrodos externos se utilizan para inyectar la corriente y los dos internos para registrar la caída de tensión. A partir de estos datos se calcula la resistividad aparente del medio, que se relaciona con el contenido de humedad, sales y cloruros que afectan el riesgo de corrosión del acero de refuerzo o de las tuberías enterradas. La configuración típica del arreglo Wenner para la evaluación de tuberías enterradas se ilustra en la **Figura 1**.

Figura 1

Esquema del arreglo Wenner de cuatro electrodos aplicado al diagnóstico de corrosión externa en una tubería enterrada



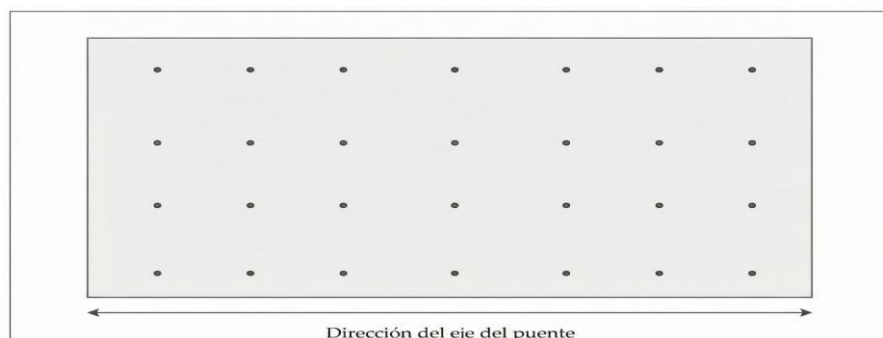
Fuente: elaborado en base a Peabody (2001).

https://books.google.com/books/about/Peabody_s_Control_of_Pipeline_Corrosion.html?id=7h6HQgAACAAJ

En una campaña típica de diagnóstico se define una malla de puntos de medición sobre la estructura a estudiar, ya sea siguiendo el eje de una tubería enterrada, cubriendo el fondo de un tanque o trazando líneas paralelas sobre una losa de puente. En cada punto se clavan o apoyan los electrodos, se ajusta la separación a según la profundidad de interés y se registran varias lecturas consecutivas para minimizar el ruido. Posteriormente, las resistividades calculadas se organizan en mapas o perfiles que permiten identificar zonas de baja resistividad asociadas a entornos más agresivos. Cuando se emplean equipos comerciales como TESTACOR o XS-100, el procedimiento se automatiza parcialmente, pero se mantiene la lógica básica de selección de puntos, configuración de electrodos y registro controlado de corriente y voltaje. Un esquema representativo de la malla de puntos de medición definida sobre la losa de un puente para la elaboración de mapas de resistividad se muestra en la **Figura 2**.

Figura 2

Malla de puntos de medición de resistividad eléctrica sobre la losa de un puente para la generación de mapas de riesgo de corrosión



Fuente: elaborado en base a Federal Highway Administration [FHWA] (2023).

<https://infotechnology.fhwa.dot.gov/electrical-resistivity/>

Para que el método entregue resultados reproducibles es necesario controlar condiciones como la humedad superficial, la temperatura ambiente y el tipo de contacto entre electrodo y material. En concreto armado, por ejemplo, suele prehumedecerse la superficie para estabilizar la conductividad del recubrimiento, mientras que en suelos se procura evitar mediciones inmediatamente después de lluvias extremas. La correcta documentación de estos parámetros, junto con la calibración periódica del equipo, resulta esencial para que las mediciones de resistividad puedan interpretarse de forma confiable y compararse entre distintas campañas o estructuras.

3. Resultados

Se revisó sistemáticamente la literatura especializada para estudios específicos para la identificación y síntesis de trece estudios de investigación utilizados para inspeccionar la corrosión de estructuras metálicas mediante técnicas de sondeo eléctrico. Los trece documentos seleccionados incluyen tantos estudios de caso aplicados, normas técnicas y revisiones de referencia. El primer grupo (es decir, investigación empírica centrada en suelos y estructuras enterradas) utiliza la resistividad eléctrica como una medida indirecta de la agresividad corrosiva alrededor de tuberías y tanques de almacenamiento. Otra categoría corresponde a guías y normas (ASTM, FHWA, ISO, EPA) que sistematizan procedimientos de medición, calibración y aceptación, sirviendo como base normativa para campañas de diagnóstico eléctrico.

Finalmente, se incluyen trabajos de revisión e integración tecnológica, investigando la integración de la resistividad eléctrica con otros dispositivos no destructivos y algoritmos de inteligencia artificial. En cuanto a la tipología, los informes consisten en tres tipos principales: enterrados (tuberías y tanques), elementos de concreto reforzado (vigas, columnas y tableros de puentes), y documentos normativos o metodológicos.

Las mediciones de resistividad del suelo dominadas por arreglos de cuatro electrodos, campañas de campo y rangos de $\Omega \cdot m$ para zonificar el riesgo de corrosión externa están en el primer grupo. Por otro lado, en la segunda parte, la resistividad del concreto se utiliza como un indicador de la probabilidad de corrosión del refuerzo, centrándose en delimitar umbrales y el impacto de factores como la humedad, la temperatura y el espesor del recubrimiento. Una tercera revisión se refiere a las normas revisadas que recomiendan la estandarización de protocolos de prueba y la integración de la resistividad con otras técnicas electroquímicas.

La **Tabla 2** (síntesis de estudios) resume para cada documento las variables principales analizadas, el tipo de estructura, el método eléctrico empleado y el aporte específico al diagnóstico de corrosión.

Tabla 2

Síntesis de estudios seleccionados sobre sondeos eléctricos y corrosión

Artículo	Autores / año	Variable principal	Estructura / Material	Método o Técnica Eléctrica	Metodología aplicada	Importancia / Hallazgo principal	Conclusión del estudio
Soil resistivity measurement for corrosivity assessment using Barnes method.	Adeoti et al. (2018)	Resistividad del suelo como indicador indirecto de corrosividad; influencia de humedad y sales	Suelo circundante a tuberías y estructuras enterradas	Medición de resistividad (método Barnes/4 electrodos equivalentes)	Campaña de campo con malla de puntos y profundidades; interpretación por rangos de $\Omega \cdot m$	La resistividad baja correlaciona con ambientes más agresivos (humedad/salinidad/pH), útil para predicción de ataque externo	Mapear resistividad permite zonificar riesgo, seleccionar recubrimientos y justificar protección catódica preventiva
Corrosion standards and wear standards	Advancing Standards Transforming Markets [ASTM] (2025)	Criterios normativos, procedimientos de ensayo, calibración y aceptación	Metales (acero) y concreto armado	— (marco normativo para ER, HCP, EIS, etc.)	Compendio de normas y guías técnicas	Homologa métodos, equipos y reportes; facilita reproducibilidad y comparabilidad entre proyectos	La adopción de estándares reduce incertidumbre y eleva la trazabilidad de campañas de diagnóstico eléctrico
Bridge - Electrical Resistivity (ER)	Federal Highway Administration [FHWA] (2023)	Resistividad del concreto como proxy de condiciones que favorecen corrosión de armaduras	Tableros y losas de puentes (RC)	Resistividad eléctrica (Wenner/4 puntos)	Guía técnica y casos de aplicación	Integra ER en protocolos de auscultación de puentes y priorización de mantenimiento	ER es un indicador robusto para priorizar intervenciones y programar mantenimiento predictivo

Tabla 2

Síntesis de estudios seleccionados sobre sondeos eléctricos y corrosión (continuación)

Artículo	Autores / año	Variable principal	Estructura / Material	Método o Técnica Eléctrica	Metodología aplicada	Importancia / Hallazgo principal	Conclusión del estudio
What is the half-cell potential test?	De Carufel (2023)	Potencial de media celda (probabilidad de corrosión activa)	Acero de refuerzo embebido	Half-Cell Potential (Cu/CuSO ₄)	Mapeo superficial de potenciales; criterios de probabilidad de corrosión	Permite inferir actividad electroquímica sin exponer el acero; sensible a humedad/recubrimiento	Recomienda combinar HCP con ER para reducir falsos positivos/negativos y mejorar diagnóstico
Influencia de la corrosión en varillas de acero de refuerzo, y sus efectos en la resistencia estructural de edificaciones	Chiriboga-Chiriboga et al. (2022)	Efectos de corrosión en capacidad resistente	Concreto armado (vigas/columnas)	— (revisión aplicada con referencia a ER/HCP)	Análisis documental con evidencia experimental	Conecta degradación por corrosión con pérdida de adherencia y capacidad	Urge monitoreo NDE (ER/HCP/EIS) para gestionar el ciclo de vida estructural
Electrical Resistivity and Tomography (ERT)	clu-in.org (2020)	Tomografía de resistividad del subsuelo (2D/3D)	Suelos y entorno de tanques/tuberías	ERT; VES; arreglos Wenner/Schlumberger	Imagen geofísica con inversión de datos	Localiza zonas de alta conductividad (humedad/sales/fugas), asociadas a mayor agresividad	ERT ayuda a delimitar focos de corrosión externa y orientar medidas de mitigación
A case study of soil-side corrosion of aboveground storage tanks in the middle east	Farhat (2018)	Corrosión por el lado del suelo; salinidad y baja ER	Tanques de acero (fondo)	Mediciones de resistividad/monitoreo	Estudio de caso con análisis de suelo y condición del fondo	Suelos salinos con ER muy baja aceleran el ataque del fondo del tanque	Requiere control del suelo, recubrimientos adecuados y protección catódica continua

Tabla 2

Síntesis de estudios seleccionados sobre sondeos eléctricos y corrosión (continuación)

Artículo	Autores / año	Variable principal	Estructura / Material	Método o Técnica Eléctrica	Metodología aplicada	Importancia / Hallazgo principal	Conclusión del estudio
Improved corrosion inspection procedures for reinforced concrete bridges: electrical resistivity of concrete	Morales & Isgor (2015)	Resistividad del concreto; factores que afectan medición	Puentes y elementos de RC	Wenner/4 puntos	Procedimientos mejorados; umbrales y correcciones	Define variables críticas (humedad, temperatura, recubrimiento) que alteran ER	ER, bien controlada, prioriza reparaciones y extiende vida útil
ISO 24367:2023 – Non-destructive testing - Acoustic emission testing - Metallic pressure equipment	International Standards [ISO] 2023	Emisión acústica (detección de eventos dinámicos)	Equipos metálicos a presión	— (emisión acústica; complementario a eléctricos)	Norma de ensayo y evaluación	AE detecta nucleación/propagación de defectos no visibles	Integrar AE con eléctricos aporta capacidad de alerta temprana
The electrochemistry of corrosion	Brown & Mears (1938)	Termodinámica/cinética de corrosión; densidad de corriente	Sistemas acero-medio	— (fundamento)	Tratado teórico	Base para interpretar ER, HCP, EIS y sondas ER	Las mediciones eléctricas deben leerse bajo principios electroquímicos para evitar sesgos
Empleo de la técnica espectroscópica de impedancia electroquímica (EIS) para evaluar una celda de corrosión	Yepes (2022)	Impedancia; resistencia de polarización	Celda/lotes de armaduras	EIS (Espectroscopia de Impedancia)	Ensayo electroquímico en laboratorio	Discrimina estados pasivos/activo y cinética de corrosión	EIS valida inhibidores y calibra umbrales usados en campo

Tabla 2

Síntesis de estudios seleccionados sobre sondeos eléctricos y corrosión (continuación)

Artículo	Autores / año	Variable principal	Estructura / Material	Método o Técnica Eléctrica	Metodología aplicada	Importancia / Hallazgo principal	Conclusión del estudio
Multi-NDE technology approach to improve interpretation of corrosion in concrete bridge decks based on electrical resistivity measurements	Khudhair & Gucunski (2023)	Fusión de datos (ER + otros) con ML/IA	Losas/Tablones de puentes RC	ER integrada con otras NDE	Integración multi-sensor + aprendizaje automático	Aumenta sensibilidad diagnóstica y reduce sesgo humano	La combinación ER + IA mejora clasificación de estados y decisiones de mantenimiento
Electrical resistivity measurements for nondestructive evaluation of chloride-induced deterioration of reinforced concrete. A review	Robles et al. (2022)	Umbral ER para daño por cloruros; variables de influencia	Concreto armado en ambiente salino	Resistividad (Wenner/4 puntos)	Revisión sistemática de métodos y casos	Normaliza umbrales y discute correcciones por humedad/temperatura/recubrimiento	ER es predictor indirecto útil si se controla el contexto y se triangula con otras medidas

Análisis: la investigación hacia el trabajo en este campo es más activa, con análisis auxiliares (por ejemplo, Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS), emisión acústica o técnicas ultrasónicas) utilizados para mejorar la sensibilidad diagnóstica y proporcionar una visión más amplia del estado del material. La validación y reducción de la incertidumbre para estas combinaciones también se puede lograr si se establecen correlaciones entre los parámetros electroquímicos y mecánicos en este caso. Alternativamente, esta información se evidencia en una aplicación del mundo real, como puentes y tanques de almacenamiento, donde tanto la baja resistividad como la alta salinidad del suelo son los dos elementos clave para las tasas de corrosión, y por lo tanto, la prevención se puede establecer proporcionando protección catódica y con recubrimientos especiales.

Los estudios normativos y las revisiones sistemáticas (ASTM, ISO, EPA) enfatizan la importancia de la estandarización en los protocolos de medición para derivar evaluaciones confiables, y esto será necesario en este caso. Los proyectos de ingeniería civil y el mantenimiento predictivo necesitan estos elementos. Además, hay indicios de una tendencia hacia la digitalización y la aplicación de inteligencia artificial para agrupar

datos de diferentes métodos no destructivos. Estos desarrollos ahora son parte de un nuevo período para la gestión de la integridad estructural que integra mediciones eléctricas, sensores inteligentes y métodos de aprendizaje automático para ofrecer los diagnósticos más precisos y las decisiones de mantenimiento basadas en la evidencia cuantitativa.

4. Discusión

El potencial de los sondeos eléctricos para prevenir daños en estructuras metálicas y apoyar la gestión de infraestructura superficial y enterrada se evidencia en los trece estudios sintetizados en la **Tabla 2**. En conjunto, la literatura muestra que la resistividad eléctrica del medio sea suelo o concreto, se utiliza como parámetro indirecto para estimar el riesgo de corrosión y planificar acciones de mantenimiento en tuberías, tanques, elementos de concreto reforzado y tableros de puentes (Adeoti et al., 2018; Morales & Isgor, 2015; Robles et al., 2022). La evidencia empírica resulta favorable, aunque su interpretación depende de condiciones ambientales, del tipo de estructura y de la correcta calibración del procedimiento de medición.

4.1. Validación empírica en distintos tipos de estructuras

Para tuberías y estructuras enterradas, los análisis de Adeoti et al. (2018) y Ozegin et al. (2011) demuestran que la resistividad del suelo es un criterio indirecto relevante de agresividad, particularmente cuando se consideran el contenido de humedad, salinidad y pH. Como se muestra en la **Tabla 2**, el uso de arreglos de cuatro electrodos en campañas de campo permite zonificar áreas de alto riesgo y justificar sistemas de protección catódica o recubrimientos especializados en secciones críticas, en concordancia con estudios sobre inhibidores y revestimientos anticorrosivos en acero de refuerzo (Mantilla-Rojas & Cuellar-Martínez, 2023). Cuando se incorporan sondas de resistencia eléctrica, el monitoreo puede complementarse con registros temporales de pérdida de material y tendencia de corrosión (Metal Samples, 2026).

En cuanto a las estructuras de hormigón armado, la resistividad del concreto funciona como un indicador indirecto del estado de las armaduras, como se evidencia en los estudios incluidos en la **Tabla 2**. Morales & Isgor (2015), Paredes et al. (2013) y Robles et al. (2022) coinciden en que niveles bajos de resistividad se relacionan con contenidos elevados de cloruros, saturación del concreto y mayor probabilidad de corrosión activa del acero. Estos hallazgos se articulan con estudios sobre pérdida de adherencia, disminución de capacidad resistente y deterioro progresivo de vigas, columnas y tableros de puente (Chiriboga-Chiriboga et al., 2022).

En tanques de almacenamiento, Farhat (2018) muestra que los suelos salinos de muy baja resistividad pueden acelerar el ataque desde la parte inferior del tanque. De forma complementaria, clu-in.org (2020) describe que la tomografía de resistividad eléctrica permite caracterizar zonas de alta conductividad alrededor de tanques y tuberías, lo que facilita la identificación de posibles fugas y focos de corrosión externa. Además,

Mugongo & Dominguez (2022) destacan que las sondas de resistencia eléctrica aportan una dimensión temporal al seguimiento del deterioro, ya que permiten observar variaciones de pérdida de espesor en activos de petróleo y gas.

En las plataformas de puentes, Khudhair & Gucunski (2023) muestran que la combinación de mediciones de resistividad con otros métodos no destructivos, procesados mediante algoritmos de aprendizaje automático, favorece la discriminación de diferentes estados de deterioro. La **Tabla 2** refleja que la principal ventaja de estos enfoques es su capacidad para convertir múltiples fuentes de datos en criterios de priorización del mantenimiento, especialmente cuando se integran resistividad eléctrica, potencial de media celda y otros registros de condición estructural.

4.2. Comparación de instrumentación y desempeño operativo

Los instrumentos reportados en los estudios revisados incluyen medidores de resistividad de cuatro electrodos, sondas de resistencia eléctrica, sistemas de tomografía y equipos asociados a otras técnicas no destructivas como ultrasonido, emisión acústica y evaluación térmica (Ibarra-Castanedo et al., 2013; International Standards [ISO], 2023; hqts.com, 2022; Metal Samples, 2026). A nivel operativo, la literatura indica que el desempeño de la instrumentación depende de la técnica de aplicación, la calibración, el contacto electrodo-superficie y la corrección de condiciones ambientales como humedad, temperatura y espesor de recubrimiento (Morales & Isgor, 2015; Robles et al., 2022).

La instrumentación multisensor reduce la ambigüedad interpretativa cuando las mediciones eléctricas se combinan con otros métodos NDT, como se resume en la **Tabla 2**. Por ejemplo, el uso conjunto de resistividad, potencial de media celda y espectroscopía de impedancia electroquímica permite distinguir entre probabilidad de corrosión, actividad electroquímica y propiedades del medio analizado (Brown & Mears, 1938; De Carufel, 2023; Herrera et al., 2020; Yepes, 2022). En este sentido, la convergencia de varios indicadores fortalece la confiabilidad diagnóstica frente a estructuras con condiciones heterogéneas.

4.3. Limitaciones metodológicas y desafíos de interpretación

Aunque la **Tabla 2** revela varias aplicaciones exitosas, también evidencia limitaciones de los enfoques de sondeo eléctrico. Una primera limitación es que estas técnicas se centran en la inferencia de procesos electroquímicos, por lo que otros mecanismos de deterioro, como agrietamiento por fatiga, delaminación o daño por impacto, pueden pasar desapercibidos si no se complementan con métodos mecánicos, térmicos, acústicos o de imagen (Ibarra-Castanedo et al., 2013; International Standards [ISO], 2023; safetyculture.com, 2026). Además, el potencial de media celda y otras mediciones son sensibles a la humedad del recubrimiento y a la continuidad eléctrica del refuerzo, lo que exige un control riguroso del procedimiento.

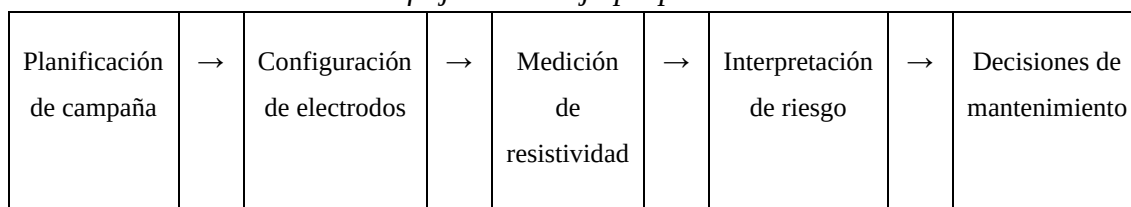
Otra limitación se relaciona con la definición de umbrales y la existencia de zonas grises de interpretación. En suelos y concreto, los rangos intermedios de resistividad pueden corresponder a situaciones diferentes debido a variaciones en cloruros, pH, humedad,

temperatura y composición del medio (Brown & Mears, 1938; Robles et al., 2022; Salazar-Jiménez, 2015). Por ello, la extrapolación directa de rangos propuestos en normas o revisiones a contextos ambientales distintos puede generar diagnósticos imprecisos si los límites de referencia no se calibran previamente (Advancing Standards Transforming Markets [ASTM], 2025; Robles et al., 2022). Finalmente, el requisito de acceso eléctrico y contacto adecuado limita el uso del método en elementos recubiertos, sumergidos o con geometrías complejas.

4.4. Potencial de integración tecnológica y líneas futuras de investigación

Desde la perspectiva de la gestión de activos, los resultados de la **Tabla 2** sugieren que los sondeos eléctricos constituyen una herramienta adecuada para programas de mantenimiento predictivo, al permitir campañas repetibles de auscultación con bajo grado de intervención sobre la estructura (Advancing Standards Transforming Markets [ASTM], 2025; clu-in.org, 2020; Federal Highway Administration [FHWA], 2023; Khudhair & Gucunski, 2023). La integración de resistividad, potencial de media celda y sondas de resistencia eléctrica en plataformas digitales de gestión de infraestructura abre la posibilidad de construir historiales de degradación y modelos de vida útil para tuberías, tanques y puentes expuestos a ambientes agresivos (Farhat, 2018; Mugongo & Dominguez, 2022). El flujo de trabajo propuesto para integrar los sondeos eléctricos en programas de mantenimiento predictivo se resume en la **Figura 3**.

Figura 3
flujo de trabajo propuesto



Un camino prospectivo sugiere incorporar esquemas de medición y disposiciones de electrodos para cimentaciones profundas y elementos parcialmente sumergidos, por ejemplo, pilotes, zapatas bajo el nivel freático y estructuras en ambientes marinos. En tales casos, la disposición Wenner o Schlumberger combinada con tomografía de resistividad puede delimitar secciones con concentración de iones y gradientes de humedad alrededor de las cimentaciones, lo que puede orientar la selección de recubrimientos, sistemas de protección catódica y estrategias de mitigación (clu-in.org, 2020; Ozegin et al., 2011; Salazar-Jiménez, 2015).

Además de las losas de puentes, la combinación de métodos físicos y algoritmos de inteligencia artificial puede aportar al análisis predictivo de la corrosión. Estos algoritmos pueden entrenarse con repositorios históricos de resistividad, parámetros ambientales y registros de falla para desarrollar clasificadores de condición estructural y modelos de evolución del deterioro (Khudhair & Gucunski, 2023). En consecuencia, se requiere

avanzar hacia normas más específicas para estructuras enterradas y marinas, de modo que los procedimientos derivados de sondeos eléctricos sean reproducibles, comparables y técnicamente auditables.

5. Conclusiones

- Los hallazgos de este estudio indican que los sondeos eléctricos constituyen un enfoque no destructivo viable para evaluar el riesgo de corrosión en obras metálicas enterradas o recubiertas, como tuberías, tanques, elementos de concreto reforzado e infraestructuras industriales. Al estimar la resistividad del entorno y relacionarla con variables fisicoquímicas como humedad, cloruros y salinidad, esta técnica permite identificar zonas potencialmente vulnerables y priorizar acciones de monitoreo o mantenimiento.
- Con este estudio, se evalúa la aplicabilidad y utilidad de varias técnicas de sondeos eléctricos en condiciones prácticas, y se proporciona información útil sobre Schlumberger, Wenner y dipolo-dipolo, siempre que se realicen en condiciones experimentales controladas e interpretadas adecuadamente. Las tendencias identificadas se tomaron de los estudios de caso revisados: los valores bajos de resistividad indican una condición agresiva, lo que significa que la tasa de corrosión es mayor. Esto fue evidente en suelos de alta conductividad, concretos muy ionizados y materiales industriales que contienen factores contribuyentes significativos, como la humedad.
- El documento también abogó por la implementación de métodos de medición complementarios (sondas de resistencia eléctrica, polarización lineal y corrientes de Eddy) para mejorar la precisión del diagnóstico, si se desea una medición continua de la construcción o en tiempo real del estado estructural. Aunque sus aplicaciones, también se identificaron las limitaciones de cada uno de los métodos de medición, indicando el valor de los procedimientos integrados y el potencial de modelos de predicción multivariantes que abarcan no solo propiedades eléctricas, sino también propiedades ambientales y estructurales.
- La aplicación de sondeos eléctricos en el diagnóstico de corrosión debe entenderse como un proceso técnico condicionado por factores tecnológicos, ambientales y de ingeniería. Una medición o interpretación inadecuada puede generar falsos positivos o falsos negativos, por lo que resulta necesario controlar variables de campo, documentar las condiciones de medición y complementar la resistividad con otros ensayos cuando el contexto estructural lo requiera.
- Finalmente, el presente estudio confirma que el sondeo eléctrico, siempre que se realice de forma sistemática y bajo condiciones controladas, proporciona información útil para identificar regiones vulnerables en etapas tempranas de deterioro. Su aplicación puede contribuir al desarrollo de estrategias de

mantenimiento predictivo y a una gestión más eficiente del ciclo de vida de estructuras metálicas, especialmente en regiones expuestas a condiciones ambientales agresivas o con alta concentración de infraestructura industrial.

6. Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses en relación con el artículo presentado.

7. Derechos de autor (copyright)

Los autores son los titulares de los derechos de autor (patrimoniales y/o de explotación) de los contenidos de la revista (*copyright*).

8. Declaración de contribución de los autores

Los autores declaran haber participado de manera equitativa y sustancial en la realización de esta investigación, bajo las responsabilidades según la [Taxonomía CRediT](#) para describir las contribuciones individuales de cada autor al trabajo.

Marlon Ariel Iñamagua Cuenca realizó la conceptualización de la investigación, organización y ejecución del ensayo, recopilación y curación de los datos, revisión del análisis estadístico, interpretación de los resultados, elaboración del borrador original, preparación de tablas y figuras, revisión crítica del contenido y aprobación de la versión final del manuscrito.

Juan Sebastián Maldonado Noboa realizó la supervisión académica y metodológica de la investigación, brindó orientación durante el desarrollo del ensayo, revisó el análisis y la interpretación de los resultados, efectuó la revisión crítica del manuscrito, realizó la corrección científica y académica y aprobó la versión final para su publicación.

Divulgación de la delegación a la IA generativa

La responsabilidad del manuscrito final recae íntegramente en los autores.

Las herramientas GAI no figuran como autores y no asumen responsabilidad por los resultados finales.

Durante la preparación del manuscrito se utilizaron herramientas de inteligencia artificial generativa únicamente como apoyo editorial para revisar redacción, coherencia y formato. Los autores verificaron, corrigieron y aprobaron íntegramente el contenido final, por lo que asumen responsabilidad total sobre la exactitud científica, las citas, las referencias y los resultados presentados.

Declaración presentada por: Marlon Ariel Iñamagua Cuenca

9. Costos de financiamiento

La presente investigación fue financiada en su totalidad con fondos propios de los autores.

10. Referencias Bibliográficas

- Adeoti, L., Adegbola, R. B., & Oyeniran T. A. (2018). Soil resistivity measurement for corrosivity assessment using Barnes method. *Nigerian Research Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 3(2), 703-712.
<https://www.researchgate.net/publication/330205061>
- Advancing Standards Transforming Markets [ASTM]. (2025). *Corrosion standards and wear standards*. <https://store.astm.org/products-services/standards-and-publications/standards/corrosion-standards-and-wear-standards.html>
- Baylón, M. (2020). La trágica historia del puente de acero Silver Bridge.
<https://blog.laminasyaceros.com>. <https://blog.laminasyaceros.com/blog/la-tr%C3%A1gica-historia-del-puente-de-acero-silver-bridge>
- Brown, R. H., & Mears, R. B. (1938). The electrochemistry of corrosion. *Transactions of The Electrochemical Society*, 74(1). <https://www.sci-hub.box/10.1149/1.3494016>.
<https://iopscience.iop.org/article/10.1149/1.3494016/pdf>
- Chiriboga-Chiriboga, C., Maldonado-Noboa, J., & Chiriboga-Zuñiga, B. (2022). Influencia de la corrosión en varillas de acero de refuerzo, y sus efectos en la resistencia estructural de edificaciones. *MQRInvestigar*, 6(4), 396–419.
<https://doi.org/10.56048/MQR20225.6.4.2022.396-419>
- clu-in.org. (2020). *Geophysical Methods. Electrical resistivity tomography*. [https://clu-in.org/characterization/technologies/default2.focus/sec/Geophysical Methods/cat/Electrical Resistivity Tomography/](https://clu-in.org/characterization/technologies/default2.focus/sec/Geophysical%20Methods/cat/Electrical%20Resistivity/Tomography/)
- De Carufel, S. (2023). *What is the half-cell potential test?*
<https://www.giatecscientific.com>. <https://www.giatecscientific.com/education/what-is-the-half-cell-potential-test/>
- Farhat, H. (2018). *A case study of soil-side corrosion of aboveground storage tanks in the middle east* [The NACE International Annual Conference].
<https://doi.org/10.5006/C2018-11218>
- Federal Highway Administration [FHWA]. (2023). *Bridge - Electrical Resistivity (ER)*. InfoTechnology. <https://infotechnology.fhwa.dot.gov/electrical-resistivity/>
- Hernandez, J. (2021). *One of the deadliest U.S. accidental structural collapses happened 40 years ago today*. www.npr.org.
<https://www.npr.org/2021/07/17/1016603199>
- Herrera Hernández, H., Ruiz Reynoso, A. M., Trinidad González, J. C., Gonzalez Morán, C. O., Miranda Hernández, J. G., Mandujano Ruiz, A., Morales Hernández, J., & Orozco Cruz, R. (2020). *Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS): a review study of basic aspects of the corrosion mechanism applied to steels*. IntechOpen eBooks. <https://doi.org/10.5772/intechopen.94470>
- hqts.com. (2022). ¿Qué son los ensayos no destructivos (END) de control de calidad?
<https://www.hqts.com/es/ensayos-no-destructivos-end/>

- Ibarra-Castanedo, C., Tarpani, J. R., & Maldague, X. P. V. (2013). Nondestructive testing with thermography. *European Journal of Physics*, 34(6), S91.
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0143-0807/34/6/S91>
- International Standards [ISO]. (2023). *ISO 24367:2023 – Non-destructive testing - Acoustic emission testing - Metallic pressure equipment (first edition)*.
<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/4f0fc43b-b887-491f-850a-6417d1b14500/iso-24367-2023>
- Khudhair, M., & Gucunski, N. (2023). Multi-NDE technology approach to improve interpretation of corrosion in concrete bridge decks based on electrical resistivity measurements. *Sensors*, 23(19), 8052. <https://doi.org/10.3390/s23198052>
- Mantilla-Rojas, C. S., & Cuellar-Martínez, R. G. (2023) *Evaluación de un revestimiento a base de almidón de yuca como inhibidor de la corrosión en el acero de refuerzo* [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia].
<https://repository.ucatolica.edu.co/entities/publication/245fa1bd-e43d-44f8-b028-9b91ae878e70>
- Metal Samples. (2026). *Introduction to Electrical Resistance (ER) monitoring*.
<https://www.alspi.com/erintro.htm>
- Morales, M., & Isgor, O. B. (2015). *Improved corrosion inspection procedures for reinforced concrete bridges: electrical resistivity of concrete* [College work, Oregon State University, United States of America]. <https://rosap.nsl.bts.gov/view/dot/29417>
- Mugongo, D., & Dominguez Olivo, J. (2022). *Case studies on vapor corrosion inhibitor monitoring using electrical resistance probes for oil and gas assets* [Annual Conference Expo]. <https://doi.org/10.5006/C2022-17855>
- Ozegin, K. O., Okolie, E. C., & Oseghale, A. (2011). Assessment of subsurface corrosion severity using electrical resistivity methods in Igarra, Edo state, Nigeria. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 1(4), 2055-2061.
https://www.researchgate.net/publication/326391947_ASSESSMENT_OF_SUBSURFACE_CORROSION_SEVERITY_USING_ELECTRICAL_RESISTIVITY_METHODS_IN_IGARRA_EDO_STATE_NIGERIA
- Paredes, J., Prieto, J., & Santos, E. (2013) *Corrosión del acero en elementos de hormigón armado: vigas y columnas* [Tesis de pregrado, Escuela Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador].
<https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/24384>
- Peabody, A. W. (2001). *Peabody's control of pipeline corrosion* (2nd ed). NACE International.
https://books.google.com/books/about/Peabody's_Control_of_Pipeline_Corrosion.html?id=7h6HQgAACAAJ

- Robles, K. P. V., Yee, J.-J., & Kee, S.-H. (2022). Electrical resistivity measurements for nondestructive evaluation of chloride-induced deterioration of reinforced concrete. A review. *Materials*, 15(8), 2725. <https://doi.org/10.3390/ma15082725>
- safetyculture.com. (2026). *Non destructive testing methods & applications*. <https://safetyculture.com/topics/non-destructive-testing/>
- Salazar-Jiménez, J. A. (2015). Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales (Nota técnica). *Revista Tecnología en Marcha*, 28(3), 127–136. <https://www.scielo.sa.cr/pdf/tem/v28n3/0379-3982-tem-28-03-00127.pdf>
- Yepes Joya, J. H. (2022). *Empleo de la técnica espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) para evaluar una celda de corrosión* [Trabajo de grado, Fundación Universitaria Los Libertadores, Bogotá, Ecuador]. <http://hdl.handle.net/11371/4673>

El artículo que se publica es de exclusiva responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan el pensamiento de la **Revista Conciencia Digital**.



El artículo queda en propiedad de la revista y, por tanto, su publicación parcial y/o total en otro medio tiene que ser autorizado por el director de la **Revista Conciencia Digital**.

