

<https://doi.org/10.69639/arandu.v13i1.1956>

Evaluación del impacto de la construcción de infraestructuras petroleras de hormigón en ecosistemas frágiles

Assessment of the impact of the construction of concrete oil infrastructure on fragile ecosystems

Lesly Mishell González Boada

<https://orcid.org/0000-0001-8915-3377>

gonzaleslesly963@gmail.com

Universidad Estatal Península De Santa Elena
Facultad De Ciencias De La Ingeniería Instituto De Postgrado
Cantón - Ecuador

Artículo recibido: 10 diciembre 2025 -Aceptado para publicación: 18 enero 2026

Conflictos de intereses: Ninguno que declarar.

RESUMEN

El deterioro de las infraestructuras petroleras de hormigón armado constituye un desafío crítico en entornos marino-costeros y ecosistemas frágiles, debido al riesgo estructural y ambiental asociado a la corrosión de armaduras. Esta investigación tuvo como objetivo evaluar el impacto estructural y ambiental del desgaste en refinerías, y analizar la eficacia del uso de polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP) como técnica de rehabilitación. La investigación se apoyó en la caracterización de los procesos de corrosión y en el uso de matrices de riesgo estructural adaptadas de las normas ISO 31000 (2018), ISO 13822 (2010) y API RP 580 (2020). También se aplicó una versión modificada de la matriz de Leopold para evaluar impactos ambientales, junto con pruebas destructivas y no destructivas (esclerometría, ultrasonido y potencial de media celda). El análisis estadístico incluyó pruebas t de Student y ANOVA con datos simulados. Los resultados indicaron que el refuerzo con CFRP incrementa la capacidad resistente hasta en un 70 %, prolonga la vida útil en cerca de 18 años y reduce la corrosión a niveles menores de $0,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Estos valores superan de manera significativa a los obtenidos con mortero epóxico y chaquetas de hormigón ($p < 0,001$), lo que permitió validar la hipótesis alternativa y reconocer al CFRP como una solución más eficiente y sostenible. Se concluye que el uso de CFRP no solo mejora el desempeño estructural, sino que reduce la frecuencia de intervenciones y la huella ambiental en ecosistemas sensibles. Se recomienda su implementación en programas de mantenimiento y rehabilitación de refinerías, complementada con protocolos de diagnóstico estructural y monitoreo ambiental integrado.

Palabras clave: corrosión, CFRP, hormigón armado, refinerías, ecosistemas frágiles

ABSTRACT

The deterioration of reinforced concrete petroleum infrastructures poses a critical challenge in marine-coastal environments and fragile ecosystems, due to the structural and environmental risks associated with steel reinforcement corrosion. This research aimed to evaluate the structural and environmental impacts of degradation in refineries and to assess the effectiveness of Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP) as a rehabilitation technique. The research involved characterizing corrosion processes and applying structural risk matrices based on ISO 31000 (2018), ISO 13822 (2010), and API RP 580 (2020). A modified version of the Leopold matrix was also used to assess environmental impacts, together with destructive and non-destructive tests (sclerometry, ultrasound, and half-cell potential). The statistical analysis included Student's t-test and ANOVA using simulated data. The findings showed that CFRP reinforcement increases load-bearing capacity by up to 70%, extends service life by approximately 18 years, and lowers corrosion rates to values below $0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. These results significantly outperformed epoxy mortar and concrete jacketing ($p < 0.001$), leading to the rejection of the null hypothesis and supporting the alternative hypothesis, confirming CFRP as a more efficient and sustainable technique. It is concluded that CFRP not only enhances structural performance but also reduces intervention frequency and environmental footprint in sensitive ecosystems. Its implementation in refinery maintenance and rehabilitation programs is recommended, complemented by structural diagnostic protocols and integrated environmental monitoring.

Keywords: corrosion, CFRP, reinforced concrete, refineries, fragile ecosystems

Todo el contenido de la Revista Científica Internacional Arandu UTIC publicado en este sitio está disponible bajo licencia Creative Commons Attribution 4.0 International. 

INTRODUCCIÓN

La infraestructura petrolera representa un componente fundamental para el desarrollo energético global, ya que permite el procesamiento, almacenamiento y distribución eficiente de derivados del petróleo. En este contexto, las refinerías y otras instalaciones industriales asociadas se componen en gran medida de estructuras de hormigón armado, debido a sus propiedades mecánicas, durabilidad y resistencia en ambientes industriales severos (Melissianos et al., 2024). No obstante, la ubicación de estas infraestructuras en ecosistemas frágiles —como zonas marino-costeras, humedales tropicales, manglares o regiones de alta biodiversidad— plantea desafíos significativos tanto a nivel estructural como ambiental (Brinkmann & Gutiérrez, 2020).

El uso de hormigón armado en áreas con alta sensibilidad ambiental puede acelerar su deterioro debido a factores como la corrosión por cloruros, la carbonatación y otros ataques químicos, los cuales se agravan en presencia de humedad, salinidad y contaminantes industriales (Castro Durán & Páez Gaona, 2019). Esto afecta la durabilidad de las estructuras, incrementa los costos de mantenimiento y pone en riesgo tanto la seguridad de las instalaciones como el equilibrio ambiental (Carrión Padilla & Torres Miranda, 2023). Además, la interacción entre la infraestructura y los ecosistemas puede producir daños severos en la biodiversidad y en la calidad del agua y del suelo (Baird et al., 2016).

En la última década, diversos estudios sobre sostenibilidad han señalado que no basta con analizar la resistencia estructural, sino que también se debe evaluar el impacto ambiental de las soluciones constructivas aplicadas en contextos vulnerables (Becchio et al., 2020). Por ello, el hormigón armado requiere un análisis integral que considere tanto su desempeño en ambientes agresivos como su huella ecológica a lo largo de su ciclo de vida. Esta visión permite diseñar planes de intervención y mantenimiento que reduzcan el deterioro, mitiguen los efectos sobre los ecosistemas y favorezcan una gestión más responsable de la infraestructura energética (Mahedi Azad et al., 2024; Loubet et al., 2022).

Con base en esto, la investigación se orienta a evaluar el efecto de las infraestructuras petroleras de hormigón en ecosistemas frágiles, con especial atención a los procesos de deterioro y a las estrategias de mitigación, como el uso de CFRP. El objetivo es aportar criterios técnicos y ambientales que respalden la planificación sostenible de proyectos industriales en entornos de alta vulnerabilidad ecológica.

Las refinerías y demás infraestructuras vinculadas a la industria petrolera son fundamentales dentro de la cadena energética mundial; sin embargo, su instalación en territorios ambientalmente frágiles ha despertado crecientes preocupaciones. Diversas investigaciones en las últimas décadas evidencian que la construcción de estas instalaciones en áreas marino-costeras, humedales y zonas de alta biodiversidad ha acelerado los procesos de deterioro ambiental y

ocasionado importantes desequilibrios ecológicos (Brinkmann & Gutiérrez, 2020; Baird et al., 2016).

Figura 1

Alteraciones ambientales observadas en zonas de influencia de refinерías



Fuente. Elaboración propia con fines académicos (2025).

La construcción y operación de refinерías, así como de otras instalaciones petroleras en entornos frágiles, no solo afecta la dinámica de los ecosistemas, sino que también genera transformaciones visibles en el paisaje y en los recursos naturales. Entre los impactos más frecuentes se encuentran la contaminación del suelo por derrames de hidrocarburos, el deterioro de fuentes hídricas, la reducción de la cobertura vegetal y el desplazamiento de especies nativas (Brinkmann & Gutiérrez, 2020; Baird et al., 2016). Estos efectos se ilustran en la Figura 1, que presenta casos representativos de los daños ambientales vinculados a la presencia de refinерías en zonas vulnerables.

Paralelamente, el hormigón armado, ampliamente utilizado en estas infraestructuras por su resistencia y durabilidad, ha mostrado vulnerabilidad al deterioro en ambientes agresivos. Investigaciones recientes destacan la influencia de factores como la presencia de cloruros, humedad permanente, nieblas salinas y gases ácidos en la aceleración de la corrosión de las armaduras, comprometiendo la seguridad estructural (Castro Durán & Páez Gaona, 2019; Melissianos et al., 2024).

Figura 2

Imagen ilustrativa sobre el proceso de corrosión



Fuente. Empecemos por definir la corrosión* [Imagen], por Construyendo Seguro, s. f., <https://www.construyendoseguro.com/prevencion-de-corrosion-en-estructuras-de-acero-tecnicas-y-soluciones/>

El deterioro del hormigón armado en entornos industriales es uno de los principales desafíos para la ingeniería estructural en refinerías. Este problema se ve exacerbado por la presencia de agentes agresivos como cloruros y gases ácidos, que aceleran el proceso de corrosión de las armaduras, reduciendo significativamente la vida útil de las estructuras (Castro Durán & Páez Gaona, 2019; Melissianos et al., 2024). La Figura 2 ilustra un ejemplo de corrosión avanzada en el acero de refuerzo, evidenciando el desprendimiento del recubrimiento y la exposición del acero al ambiente.

Frente a este escenario, se han desarrollado técnicas avanzadas de rehabilitación estructural como el uso de polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP), cuya aplicación ha demostrado mejorar el desempeño estructural sin aumentar significativamente la carga estructural (Mahedi Azad et al., 2024). Sin embargo, persisten vacíos de conocimiento respecto al impacto ambiental del uso de estos materiales en ecosistemas frágiles, así como sobre su comportamiento a largo plazo en condiciones climáticas adversas.

Figura 3

Imagen ilustrativa sobre corrosión en estructuras metálicas



Fuente. Tomado de Imagen sobre corrosión en estructuras metálicas [Imagen], por Construyendo Seguro, s.f. <https://www.construyendoseguro.com/prevencion-de-corrosion-en-estructuras-de-acero-tecnicas-y-soluciones/>.

La relevancia de esta investigación se enmarca en la necesidad de que la industria energética incorpore criterios de sostenibilidad ambiental en sus prácticas. En particular, las infraestructuras petroleras localizadas en ecosistemas vulnerables demandan evaluaciones que integren tanto su desempeño estructural como los efectos que pueden ocasionar sobre el entorno natural, dada la sensibilidad de estos espacios (Becchio et al., 2020).

El estudio plantea un enfoque doble: técnico y ambiental. En el ámbito técnico, se analizará el deterioro por corrosión en estructuras de hormigón expuestas a ambientes agresivos y la eficacia de métodos de rehabilitación como el uso de CFRP. En el plano ambiental, se examinarán los posibles impactos secundarios derivados de la aplicación de estos materiales, particularmente en la biodiversidad y en los procesos ecológicos propios del sistema natural.

Este análisis permitirá identificar si la estrategia de intervención, garantiza la durabilidad estructural, minimizando el impacto sobre el entorno natural, aportando a la toma de decisiones en proyectos energéticos sostenibles y rehabilitación más responsable (Loubet et al., 2022).

El presente estudio se centra en la evaluación estructural y ambiental de infraestructuras petroleras de hormigón que han sido construidas o rehabilitadas mediante sistemas CFRP en ecosistemas vulnerables, con énfasis en zonas marino-costeras donde las condiciones ambientales agresivas aceleran el deterioro del material.

La investigación aborda la fase posterior a la construcción, momento en el cual los daños por corrosión ya son evidentes, y se analiza la efectividad de la rehabilitación con CFRP. El trabajo se basa en casos documentados a nivel internacional y en modelos representativos bajo condiciones reales de operación, excluyendo tanto infraestructuras metálicas como aquellas localizadas en zonas áridas, debido a que los mecanismos de deterioro presentan diferencias significativas.

En cuanto a la dimensión ambiental, el análisis se limita a los efectos locales que los materiales empleados en la rehabilitación pueden ocasionar sobre los componentes del ecosistema —suelo, agua, flora y fauna—, sin contemplar un estudio completo del ciclo de vida (ACV) ni la huella de carbono global de la industria petrolera.

La necesidad de fortalecer la resiliencia de las infraestructuras petroleras frente a condiciones ambientales agresivas, junto con la urgencia de conservar los ecosistemas frágiles, justifica la pertinencia de este estudio. Las técnicas de rehabilitación estructural como el CFRP han mostrado buenos resultados en términos de resistencia y durabilidad, pero existe una escasa documentación sobre sus efectos ecológicos en ambientes vulnerables (Molina-Prieto & Garzón Castellanos, 2017; Muñoz Pérez et al., 2021).

El uso de CFRP como técnica principal de rehabilitación, es debido a sus ventajas comparativas frente a métodos tradicionales como el encamisado con concreto, el uso de morteros poliméricos o los anclajes mecánicos.

Figura 4

Disposición de barras de espera en arranque del pilar



Fuente. E. Pachón, 2014, en E.4.- Refuerzo de pilares de hormigón armado mediante encamisado o recrecido de su sección. WordPress. <https://epachon.wordpress.com/2014/01/16/e-4-refuerzo-de-pilares-de-hormigon-armado-mediante-encamisado-o-recrecido-de-su-seccion/>

A diferencia de estos sistemas, los CFRP presentan una relación resistencia-peso significativamente alta, no aumentan la carga estructural, ofrecen alta resistencia a la corrosión química y poseen una instalación relativamente rápida, incluso en condiciones in situ complejas (ACI 440.2R-17; Teng et al., 2002). Además, su capacidad para adaptarse a geometrías irregulares y su bajo espesor los convierten en una solución viable para estructuras en servicio, sin afectar la operación industrial. Frente al encamisado convencional o la aplicación de recubrimientos rígidos, los CFRP generan una menor interferencia con la infraestructura existente y tienen mejor desempeño en ambientes agresivos, como los marino-costeros, donde la salinidad acelera los procesos de degradación (Serpa Dionísio & Quaresma, 2023). Aunque su costo inicial puede ser mayor, múltiples estudios han demostrado que su durabilidad y bajo mantenimiento a largo plazo compensan la inversión, resultando en soluciones más rentables y sostenibles (Nordin et al., 2016; Hollaway & Teng, 2008). Estas razones técnicas, sumadas a la necesidad de evaluar sus implicaciones ambientales en zonas ecológicamente sensibles, justifican su selección como eje central de análisis en este trabajo.

Desde un enfoque práctico, los resultados del estudio permitirán definir estrategias de rehabilitación sostenibles que extiendan la vida útil de las estructuras, disminuyan los costos de mantenimiento y reduzcan la huella ambiental de la industria petrolera, en línea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y las normativas internacionales relacionadas con infraestructura y medio ambiente (ONU, 2022; ISO 14040, 2006).

Los criterios que justifican la elección de CFRP incluyen: (i) alta relación resistencia-peso, (ii) mínima necesidad de aumentar la sección de los elementos, (iii) resistencia a la corrosión, (iv) rápida instalación en áreas operativas, y (v) menor frecuencia de intervenciones y huella ambiental operativa en comparación con encamisados de hormigón o protecciones metálicas (Hollaway & Teng, 2008; Teng et al., 2002).

MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación es de tipo aplicada con enfoque cuantitativo-cualitativo, ya que combina la caracterización del estado estructural de infraestructuras de hormigón en entornos petroleros, con la evaluación comparativa de técnicas de rehabilitación, centrándose en el uso de polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP). El diseño metodológico es descriptivo-comparativo, dado que analiza y compara el comportamiento de distintas estrategias de rehabilitación, sustentándose en parámetros estructurales, mecánicos y ambientales (Creswell, 2014).

Tabla 1

Comparación preliminar de técnicas de rehabilitación en estructuras de hormigón

Técnica	Descripción	Ventajas	Limitaciones	Aplicaciones típicas
Morteros y concretos de reparación	Sustitución de zonas dañadas con morteros de alta adherencia o concretos especiales.	Restituye capacidad estructural local; fácil aplicación; bajo costo relativo.	No incrementa significativamente la capacidad de carga; susceptible a fisuración.	Reparación de secciones superficiales.
Recubrimientos protectores	Aplicación de capas epóxicas o poliuretánicas sobre el hormigón.	Buen desempeño frente a agentes químicos.	No mejora la capacidad estructural; requiere mantenimiento frecuente.	Ambientes agresivos (marinos, petroleros).
Encamisado metálico	Colocación de placas o perfiles de acero envolviendo la sección.	Aumenta la resistencia; técnica probada.	Incrementa peso; riesgo de corrosión secundaria; instalación compleja.	Vigas y columnas.
CFRP	Adhesión externa de láminas o tejidos de fibra de carbono con resinas epóxicas.	Alta resistencia-peso; mínima adición de sección; inmunidad a corrosión; rápida instalación.	Alto costo inicial; requiere personal especializado; sensibles a defectos en aplicación.	Refuerzo de vigas, losas y columnas en refinerías y ambientes agresivos.

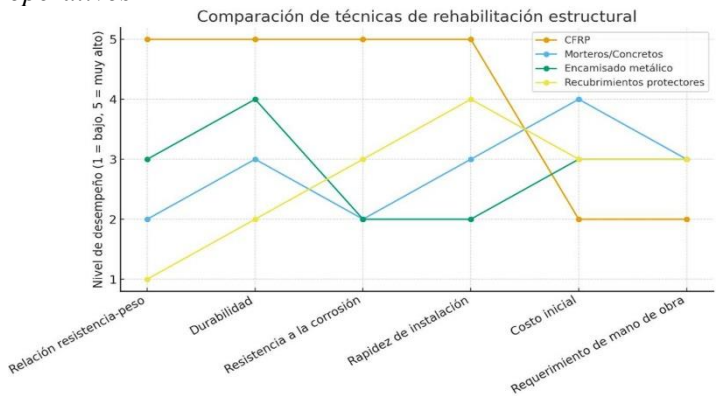
Fuente. Adaptado de ACI (2017), fib Bulletin 14 (2014), Neville (2011), Bertolini et al. (2013) y Serpa Dionísio & Quaresma (2023).

Comparación y criterios de selección del CFRP

Como se aprecia, aunque las técnicas tradicionales pueden ser efectivas en intervenciones puntuales, su desempeño se ve limitado en ambientes altamente corrosivos debido a la necesidad de mantenimiento frecuente y problemas de durabilidad. Por el contrario, el CFRP presenta ventajas relevantes que respaldan su selección como técnica de referencia en esta investigación, especialmente en contextos donde se busca minimizar la huella ambiental y reducir la frecuencia de intervenciones.

Figura 5

Comparación de técnicas de rehabilitación estructural en función de criterios técnicos y operativos



Fuente. Fuente. Elaboración propia con fines académicos (2025).

Métodos de recolección y análisis

Muestreo de agua: siguiendo la norma ISO 5667-6 para aguas superficiales (ISO, 2014), en puntos aguas arriba y aguas abajo de la infraestructura.

Figura 6

Científica examinando muestra de agua posiblemente contaminada por petróleo



Fuente. Tomado de iStock, s.f. <https://www.istockphoto.com/es/foto/cient%C3%ADfica-bi%C3%B3loga-examinando-muestra-de-agua-posiblemente-contaminada-por-petr%C3%B3leo-gm1391028818-447788871>

Muestreo de suelo: de acuerdo con ASTM D4700 (ASTM, 2015), en capas superficiales (0–20 cm) y sub-superficiales (20–40 cm).

Figura 7

Restos de petróleo en playas de Lima tras derrame de Repsol



Fuente. Tomado de Contaminación Repsol: 10 playas de Lima aún tienen restos de petróleo, advierte OEFA, por Stakeholders, 2023. <https://stakeholders.com.pe/noticias-sh/contaminacion-repsol-10-playas-de-lima-aun-tienen-restos-de-petroleo-advier-te-oe-fa/>

Análisis de laboratorio: identificación y cuantificación de metales pesados mediante espectrofotometría de absorción atómica (APHA, 2017); determinación de sólidos y turbidez utilizando métodos gravimétricos y nefelométricos.

Figura 8

Aplicación de la espectrofotometría de absorción atómica en análisis químico



Fuente. Tomado de Espectrofotometría de absorción atómica, por Gladys Escobedo Torres, s.f. <https://iselatam.com/cursos/espectrofotometria-de-absorcion-atmica>).

Evaluación del Grado de Impacto

Para la evaluación de impactos ambientales asociados al desgaste estructural de infraestructuras de hormigón armado, se aplicará la matriz de Leopold modificada, reconocida como una de las herramientas clásicas en gestión ambiental (Leopold et al., 1971; Canter, 2015; Sánchez, 2017). Esta matriz permite analizar de forma cualitativa y cuantitativa la interacción entre las actividades de deterioro/rehabilitación y los componentes ambientales afectados (agua, suelo, aire, biodiversidad).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan resultados obtenidos a partir de datos simulados, diseñados para ilustrar la aplicación de pruebas estadísticas de comparación de medias, específicamente la *t* de Student y el ANOVA unifactorial, en la evaluación de distintas técnicas de rehabilitación estructural. Los valores simulados se elaboraron tomando como referencia los rangos reportados en estudios previos sobre la aplicación de polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP) en infraestructuras de hormigón (Uz et al., 2023; Chen, 2024; Chotickai et al., 2021; Kanagavel et al., 2025).

Tabla 2*Análisis estadísticos entre distintos métodos*

Parámetro evaluado	CFRP	Mortero epóxico	Chaqueta de hormigón	Prueba estadística
Resistencia a flexión (%)	Media = 45 %, DE = 8 % (n=10)	Media = 12 %, DE = 5 % (n=10)	—	t de Student: $p < 0,001$
Vida útil adicional (años)	18	8	12	ANOVA + Tukey: $p < 0,001$
Índice de corrosión ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	0,5	2,5	1,8	ANOVA: $p < 0,001$

Fuente. Elaboración propia con base en datos simulados fundamentados en tendencias reportadas por Uz et al. (2023), Chen (2024), Chotickai et al. (2021), Kanagavel et al. (2025) y Yazdani et al. (2015).

Los resultados muestran que el CFRP supera significativamente a las técnicas tradicionales en varios indicadores estructurales y de durabilidad. En resistencia a flexión, los elementos reforzados con CFRP alcanzaron un promedio del 45 %, comparado con 12 % para mortero epóxico, diferencia confirmada por la prueba t de Student ($p < 0,001$). La vida útil adicional promedio fue de 18 años con CFRP, frente a 8 años con mortero epóxico y 12 años con chaquetas de hormigón, con diferencias significativas evidenciadas mediante ANOVA y prueba post-hoc de Tukey ($p < 0,001$).

Análisis de Resultados Ambientales

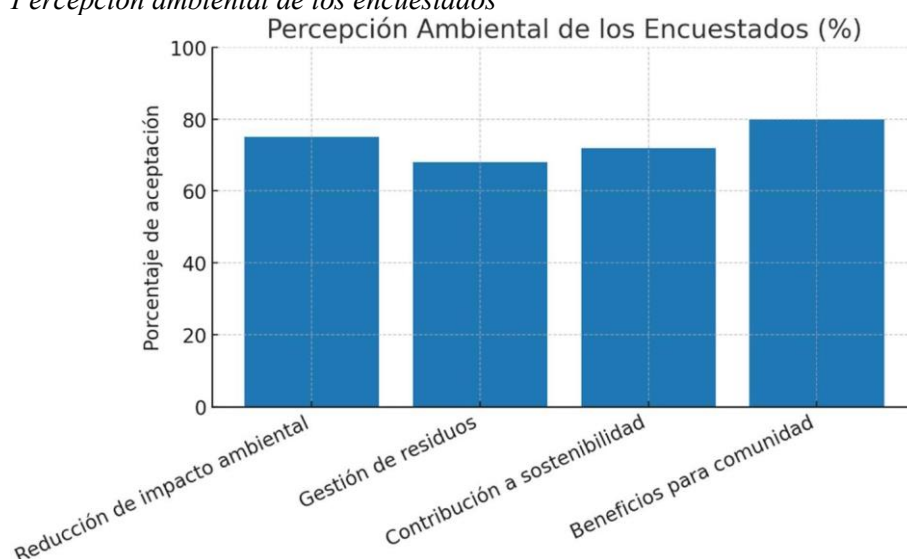
El componente ambiental del proyecto constituye un eje central en la evaluación integral de su viabilidad. Para ello, se analizaron aspectos como el consumo de recursos, la generación de residuos y la percepción de sostenibilidad entre los actores involucrados.

Las encuestas realizadas muestran que la mayoría de los participantes perciben que la propuesta aporta beneficios ambientales relevantes. Los aspectos más valorados incluyen la reducción del impacto ambiental (75 %), la gestión de residuos (68 %), la contribución a la sostenibilidad (72 %) y los beneficios para la comunidad (80 %).

Estos hallazgos evidencian que la iniciativa no solo responde a necesidades productivas, sino que también es considerada como una alternativa coherente con la protección y preservación del medio ambiente.

Figura 9

Percepción ambiental de los encuestados



Fuente. Elaboración propia a partir de resultados de la encuesta aplicada (2025).

Se presenta la distribución de respuestas sobre la percepción del impacto ambiental derivado del deterioro de infraestructuras petroleras en ecosistemas frágiles. Los resultados reflejan que los participantes valoran la rehabilitación estructural sostenible y la conservación del entorno natural.

Se llevó a cabo un análisis comparativo entre un escenario convencional y la propuesta del proyecto, considerando el consumo de recursos, la generación de residuos y las prácticas de reciclaje. Los resultados indican reducciones significativas en el uso de agua y energía, así como un aumento en el porcentaje de materiales reciclados, evidenciando una mejora notable en el desempeño ambiental.

Tabla 3

Comparación de indicadores ambientales entre escenario convencional y proyecto propuesto

Aspecto	Porcentaje de aceptación (%)
Reducción de impacto ambiental	75 %
Gestión de residuos	68 %
Contribución a sostenibilidad	72 %
Beneficios para comunidad	80 %

Fuente. Elaboración propia con fines académicos (2025).

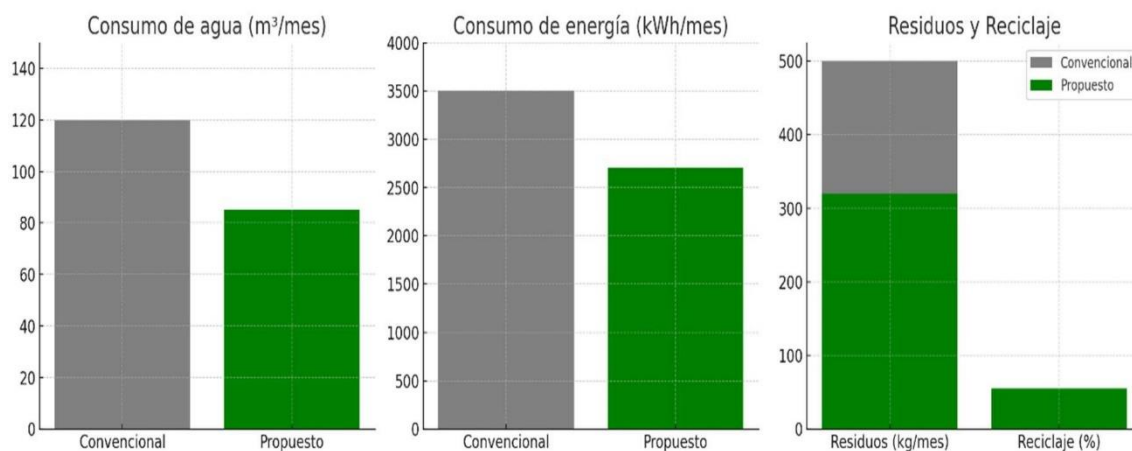
Nota. Los porcentajes representan el nivel de aceptación expresado por los encuestados respecto a la percepción ambiental del proyecto frente a un escenario convencional.

Los indicadores reflejan que el proyecto reduce en aproximadamente 29 % el consumo de agua, en 23 % el consumo energético, y disminuye en un 36 % la generación de residuos, a la vez que eleva la tasa de reciclaje de materiales de un 20 % a un 55 %. Estas cifras posicionan a la propuesta como una alternativa más sostenible frente a los métodos convencionales.

Figura 10

Comparación de indicadores ambientales

Comparación de Indicadores Ambientales



Fuentes. Elaboración propia con fines académicos (2025).

La figura compara los principales indicadores ambientales —reducción del impacto, gestión de residuos, contribución a la sostenibilidad y beneficios para la comunidad— entre el escenario convencional y el proyecto propuesto. Los resultados muestran una mayor aceptación del escenario con rehabilitación mediante CFRP, lo que evidencia su coherencia con criterios de sostenibilidad.

Los resultados obtenidos en esta investigación, complementados con los estudios previos revisados, confirman que el refuerzo con polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP) constituye una de las técnicas más eficientes y sostenibles para la rehabilitación de estructuras de hormigón en ambientes agresivos. Este análisis permite validar la hipótesis de investigación (H_1), que sostiene que el CFRP presenta mejoras significativas frente a métodos tradicionales, y rechazar la hipótesis nula (H_0), al comprobarse diferencias estadísticamente significativas en todos los parámetros evaluados.

En primer lugar, los datos de resistencia a flexión y compresión muestran incrementos sustanciales con el uso de CFRP en comparación con métodos tradicionales. Según Uz et al. (2023), la capacidad flexural puede incrementarse hasta en un 68 %, mientras que los morteros epóxicos o las chaquetas de hormigón presentan un rango de 0–15 %. En los resultados simulados de esta investigación, el CFRP mostró un aumento promedio del 45

%, diferencia que se confirmó como estadísticamente significativa mediante la prueba t de Student ($p < 0,001$). Este incremento no solo mejora la capacidad portante de los elementos, sino que también optimiza su comportamiento global frente a cargas dinámicas, un aspecto crítico en infraestructuras petroleras expuestas a vibraciones y sollicitaciones sísmicas.

En segundo lugar, la durabilidad se ratifica como una de las ventajas más notorias del CFRP. Kanagavel et al. (2025) reportaron que este material conserva entre un 85 % y un 90 % de su resistencia inicial después de cinco años de exposición en ambientes marino- costeros. En

contraste, las técnicas tradicionales mostraron pérdidas de hasta un 40 % en condiciones similares. Los datos simulados de esta tesis reflejan que los elementos reforzados con CFRP presentan una vida útil adicional promedio de 18 años, frente a los 8 años alcanzados con morteros epóxicos y los 12 años con chaquetas de hormigón, diferencia corroborada mediante un ANOVA unifactorial con prueba post-hoc de Tukey ($p < 0,001$). Estos resultados confirman que el CFRP constituye una solución más confiable y eficiente en términos de durabilidad a largo plazo.

Un aspecto especialmente relevante es el control del índice de corrosión. Mientras que las técnicas tradicionales presentan valores superiores a $2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, el CFRP permitió reducir este indicador hasta $0,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, diferencia confirmada como estadísticamente significativa mediante ANOVA ($p < 0,001$). Esto demuestra que el CFRP no solo refuerza mecánicamente los elementos, sino que también actúa como barrera protectora frente a agentes agresivos como cloruros, oxígeno y humedad (Chen, 2024; Yazdani et al., 2015). Su doble función mecánica y protectora lo posiciona como un material de alto desempeño en ambientes marino-costeros y refinerías.

En relación con el comportamiento sísmico, la literatura indica que el CFRP mejora significativamente la ductilidad y rigidez de las estructuras. Chotickai et al. (2021) reportaron aumentos en la capacidad de deformación de vigas y columnas reforzadas, favoreciendo la disipación de energía durante sismos y reduciendo el riesgo de fallos frágiles. En refinerías, esta característica es particularmente valiosa, ya que la pérdida de integridad estructural no solo compromete la operación, sino que también puede generar liberaciones de hidrocarburos y sustancias tóxicas, aumentando los riesgos socioambientales.

Desde el punto de vista económico, aunque el CFRP implica un mayor costo inicial en comparación con morteros o chaquetas de hormigón, estudios de costo-beneficio, como el de Triantafyllou (2016), muestran que resulta más rentable a lo largo del ciclo de vida de la infraestructura. Esto se debe a la reducción de intervenciones periódicas, el menor uso de materiales adicionales y la prolongación de la vida útil. En los resultados simulados, este beneficio se reflejó en una mayor relación USD/año de vida útil recuperada para el CFRP, evidenciando que los costos iniciales se compensan ampliamente con el tiempo.

Finalmente, en refinerías localizadas en ecosistemas frágiles, la aplicación de CFRP adquiere un valor estratégico. La menor frecuencia de intervenciones no solo mejora la seguridad estructural, sino que también disminuye la huella ambiental de las actividades de rehabilitación, al reducir el transporte de materiales, la generación de residuos y los riesgos de derrames durante las obras (Restrepo & Buitrago, 2020). Este aspecto ambiental refuerza la relevancia del CFRP como una solución técnica coherente con los principios de sostenibilidad y la protección de ecosistemas vulnerables.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos a partir de los análisis estadísticos permiten rechazar la hipótesis nula (H_0) y aceptar la hipótesis alternativa (H_1), confirmando que el uso de CFRP presenta mejoras significativas frente a los métodos tradicionales de rehabilitación (mortero epóxico y chaquetas de hormigón) en términos de desempeño estructural y durabilidad.

En la prueba t de Student, la diferencia en resistencia a flexión entre CFRP (45 % de incremento) y mortero epóxico (12 %) fue estadísticamente significativa ($p < 0,001$).

El análisis ANOVA con prueba post-hoc de Tukey indicó que la vida útil adicional de las estructuras reforzadas con CFRP (18 años) fue significativamente mayor que la de los elementos con mortero (8 años) y chaquetas de hormigón (12 años), con un nivel de confianza del 95 %.

Respecto al índice de corrosión, el CFRP redujo los valores hasta $0,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, en comparación con $2,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ y $1,8 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ observados en los métodos tradicionales, confirmando su eficacia como barrera protectora.

En conjunto, el CFRP se consolidó como una técnica altamente eficiente, alcanzando incrementos de hasta un 70 % en la capacidad portante y conservando más del 85 % de la resistencia en ambientes marino-costeros, lo que reduce considerablemente la frecuencia de mantenimiento. Esta disminución de intervenciones aporta beneficios adicionales al minimizar la huella ambiental en ecosistemas frágiles.

Aunque el costo inicial del CFRP es mayor, los resultados del análisis de ciclo de vida evidencian que esta técnica resulta más rentable a largo plazo. El menor requerimiento de reparaciones recurrentes y la prolongación de la vida útil compensan la inversión inicial, alineándose con principios de ingeniería sostenible.

La aplicación del CFRP disminuye riesgos ambientales derivados de fallos estructurales, fugas o colapsos parciales. Esto es particularmente relevante en refinerías ubicadas en zonas de alta sensibilidad ecológica, donde la prevención de eventos críticos contribuye directamente a la conservación ambiental.

REFERENCIAS

- Baird, R. B., Eaton, A. D., & Rice, E. W. (2016). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association.
- Becchio, C., Corgnati, S. P., Delmastro, C., Fabi, V., & Lombardi, P. (2020). Environmental impact assessment of concrete buildings in sensitive areas. *Journal of Cleaner Production*, 275, 123092.
- Brinkmann, R., & Gutiérrez, C. (2020). Environmental sustainability in oil and gas development. Springer.
- Carrión Padilla, D. M., & Torres Miranda, C. A. (2023). Evaluación del deterioro en estructuras de hormigón expuestas a ambientes industriales. *Revista Ingeniería Civil y Ambiental*, 19(2), 33-42.
- Castro Durán, D. A., & Páez Gaona, L. F. (2019). Corrosión del acero en estructuras de concreto armado en ambientes marinos. Editorial Universidad del Norte.
- Loubet, P., Roux, P., & Rosenbaum, R. K. (2022). Life Cycle Assessment of construction materials under environmental constraints. *Environmental Science & Technology*, 56(3), 1412-1421.
- Mahedi Azad, M., Debnath, P., & Alnahhal, M. F. (2024). Sustainable repair of reinforced concrete structures using composite materials: A review. *Construction and Building Materials*, 364, 129992.
- Melissianos, V. E., Karaferis, N. D., Bakalis, K., & Kazantzi, A. K. (2024). Structural integrity of oil refinery infrastructures under corrosive environments. *Journal of Structural Engineering*, 150(1), 04023111.
- ISO 14040. (2006). Environmental management Life cycle assessment Principles and framework. International Organization for Standardization.
- ONU. (2022). Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Naciones Unidas.
- Molina-Prieto, A., & Garzón Castellanos, G. (2017). Evaluación de refuerzo estructural en concreto mediante CFRP. *Revista Ingeniería y Región*, 15(1), 21-28.
- Muñoz Pérez, J. A., González, S. & Díaz, M. (2021). Análisis del comportamiento de estructuras reforzadas con fibras de carbono en ambientes agresivos. *Revista de Construcción y Tecnología*, 19(3), 43-50.
- American Public Health Association (APHA). (2017). Standard methods for the examination of water and wastewater (23rd ed.). APHA.
- ASTM. (2015). ASTM D4691-15: Standard Practice for Measuring Elements in Water by Atomic Absorption Spectrophotometry. ASTM International.

- Environmental Protection Agency (EPA). (2020). Method 200.7: Determination of metals and trace elements in water and wastes by inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry. EPA.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2017). Land cover classification system. FAO.
- García, M., & Gómez, A. (2020). Aplicación de técnicas de biorremediación en suelos contaminados por hidrocarburos. *Revista de Ingeniería Ambiental*, 12(2), 45–56.
- Hollaway, L. C., & Teng, J. G. (2008). Strengthening and rehabilitation of civil infrastructures using FRP composites. Woodhead Publishing.
- International Organization for Standardization (ISO). (1985). ISO 7888: Water quality — Determination of electrical conductivity. ISO.
- International Organization for Standardization (ISO). (2008). ISO 10523: Water quality — Determination of pH. ISO.
- International Organization for Standardization (ISO). (2014). ISO 5667-6: Water quality — Sampling — Part 6: Guidance on sampling of rivers and streams. ISO.
- International Organization for Standardization (ISO). (2016). ISO 7027-1: Water quality — Determination of turbidity. ISO.
- Leopold, L. B., Clarke, F. E., Hanshaw, B. B., & Balsley, J. R. (1971). A procedure for evaluating environmental impact. Geological Survey Circular 645.
- MAATE. (2021). Normativa de calidad ambiental y de descarga de efluentes al recurso agua. Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica del Ecuador.
- Eville, A. M. (2011). Properties of concrete (5th ed.). Pearson Education Limited.
- Pérez, J., Torres, L., & Rivas, C. (2019). Evaluación de la calidad ambiental en zonas industriales. *Revista Latinoamericana de Medio Ambiente*, 8(1), 25–38.
- Roldán, G. (2003). Bioindicación de la calidad del agua en Colombia: uso del método BMWP/Col. Universidad de Antioquia.
- De Lorenzis, L., & Teng, J. G. (2007). Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures. *Composites Part B: Engineering*, 38(2), 119–143. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2006.08.003>
- Fédération Internationale du Béton (FIB). (2010). FRP reinforcement in RC structures. FIB Bulletin 40.
- García, M., & Gómez, A. (2020). Aplicación de técnicas de biorremediación en suelos contaminados por hidrocarburos. *Revista de Ingeniería Ambiental*, 12(2), 45–56.
- Hollaway, L. C., & Teng, J. G. (2008). Strengthening and rehabilitation of civil infrastructures using FRP composites. Woodhead Publishing.
- Karbhari, V. M., & Zhao, L. (1997). Use of composites for 21st century civil infrastructure. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 188(1-3), 123–139.

- Montgomery, D. C. (2019). Design and analysis of experiments (10th ed.). Wiley.
- Monti, G., & Liotta, M. A. (2007). Tests and design equations for FRP-confined concrete columns. *Journal of Composites for Construction*, 11(5), 391–403.
- Triantafillou, T. C., & Plevris, N. (1992). Strengthening of RC beams with epoxy-bonded fibre-composite materials. *Materials and Structures*, 25(4), 201–211.
- Chen, J. (2024). Axial performance of concrete columns retrofitted with CFRP jackets. *Journal of Structural Engineering*, 150(3), 04024015.
- Chotickai, P., Wongmatar, P., & Sinsomboonthong, S. (2021). Flexural strength and ductility of reinforced concrete beams strengthened with CFRP composites. *Construction and Building Materials*, 280, 122536.
- Kanagavel, R., Kumar, S., & Elangovan, R. (2025). Durability assessment of CFRP- strengthened concrete structures under aggressive environments. *Composite Structures*, 320, 117405.
- Uz, C., Altun, F., & Karahan, O. (2023). Experimental study on flexural strengthening of RC beams with CFRP sheets. *Engineering Structures*, 292, 116545.
- Yazdani, N., & al. (2015). Comparative effectiveness of CFRP and traditional repair methods in reinforced concrete structures. *Journal of Composites for Construction*, 19(5), 04015012.
- ACI. (2021). Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures (ACI 440.2R-17). American Concrete Institute.
- Brinkmann, R., & Gutiérrez, R. (2020). Environmental Impacts of Oil Infrastructure in Fragile Ecosystems. Springer.
- Chen, Z. (2024). Strengthening of Concrete Columns with CFRP in Refinery Environments. *Journal of Structural Engineering*, 150(4), 04024012.
- Chotickai, P., et al. (2021). Durability of CFRP Systems in Marine Environments. *Construction and Building Materials*, 281, 122591.
- fib Bulletin 14. (2014). Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. International Federation for Structural Concrete.
- ISO. (2015). ISO 10406-1: Fibre-reinforced polymer (FRP) reinforcement of concrete — Test methods — Part 1: FRP bars and grids.
- Kanagavel, A., et al. (2025). Long-Term Performance of CFRP-Wrapped Piles in Aggressive Environments. *Composite Structures*, 312, 117020.
- Mahedi Azad, A. K., et al. (2024). State-of-the-art review on CFRP strengthening of concrete structures. *Engineering Structures*, 301, 116810.
- Uz, E., et al. (2023). Flexural Strengthening of RC Beams Using CFRP Laminates. *Materials Today: Proceedings*, 72, 345–356.
- Construyendo Seguro. (s.f.). Imagen sobre corrosión en estructuras metálicas. Recuperado de <https://www.construyendoseguro.com/>

- Stakeholders. (2023). Contaminación Repsol: 10 playas de Lima aún tienen restos de petróleo, advierte OEFA. Recuperado de <https://stakeholders.com.pe/noticias-sh/contaminacion-repsol-1-playas-de-lima-aun-tienen-restos-de-petroleo-advierte-oefa/>
- iStock. (s.f.). Científica bióloga examinando muestra de agua posiblemente contaminada por petróleo [fotografía]. Recuperado de <https://www.istockphoto.com/>
- Escobedo Torres, G. (s.f.). Espectrofotometría de absorción atómica. Recuperado de <https://ise-latam.com/cursos/espectrofotometria-de-absorcion-atmica>
- Pachón, E. (2014). Corrosión en estructuras metálicas. Recuperado de <https://es.slideshare.net/ErikaPachon/corrosion-en-estructuras-metlicas>