Recent advances in the manufacturing of additives as anticorrosive agents for reinforcing steel

Bravo Apaza, Jinmer[1]; Chávarry Vallejos, Carlos Magno[2]; García Arévalo, Edwar[3]; Montañez Tupayachi, Americo[4]; Loayza Lozano, Prysila Abilen[5]
[1]Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, Abancay, *jbravo@unamba.edu.pe*
[2,5]Universidad nacional Federico Villarreal, Lima, Perú, *cchavarry@unfv.edu.pe, prysila36@gmail.com*
[3]Universidad Cesar Vallejo, Lima, Perú, *ggarciaar25@ucvvirtual.edu.pe*
[4]Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Perú, *americo.montañez@unsaac.edu.pe*

Abstract*– In recent years, research on additives for the protection of reinforcing steel advanced significantly, highlighting the development of more efficient and sustainable technologies. Anticorrosive additives emerged as key tools for mitigating corrosion, a phenomenon that compromised the durability and safety of reinforced concrete structures. Traditional approaches, based on chemical inhibitors such as nitrates and phosphates, evolved toward more environmentally friendly solutions, including green inhibitors derived from natural sources. Among these, organic compounds were widely studied due to their anticorrosive properties, biodegradability, and low environmental impact. These additives acted by forming protective layers on the steel surface, blocking the electrochemical processes that drive corrosion. Furthermore, advances in nanotechnology enabled the incorporation of nanoparticles into coatings and concrete mixes, enhancing resistance to corrosive agents. Another significant advancement was the development of multifunctional additives that not only inhibited corrosion but also improved mechanical properties and workability of concrete. The combination of advanced technologies and sustainable strategies promoted a shift toward more efficient, cost-effective, and eco-friendly protection systems. This paper reviewed recent advances, current limitations, and future opportunities in the use of anticorrosive additives for reinforcing steel.

Keywords: Anticorrosive additives, Reinforcing steel, Anticorrosive, Nanotechnology, Sustainability.

Avances recientes en la fabricación de aditivos como agentes anticorrosivos del acero de refuerzo

Bravo Apaza, Jinmer[1]; Chávarry Vallejos, Carlos Magno[2]; García Arévalo, Edwar[3]; Montañez Tupayachi, Americo[4]; Loayza Lozano, Prysila Abilen[5]
[1]Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, Abancay, *jbravo@unamba.edu.pe*
[2,5]Universidad nacional Federico Villarreal, Lima, Perú, *cchavarry@unfv.edu.pe, prysila36@gmail.com*
[3]Universidad Cesar Vallejo, Lima, Perú, *ggarciaar25@ucvvirtual.edu.pe*
[4]Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Perú, *americo.montañez@unsaac.edu.pe*

Resumen - En los últimos años, la investigación en aditivos para la protección del acero de refuerzo avanzó significativamente, destacando el desarrollo de tecnologías más eficientes y sostenibles. Los anticorrosivos se posicionaron como herramientas clave para mitigar la corrosión, un fenómeno que comprometió la durabilidad y seguridad de las estructuras de concreto reforzado. Los enfoques tradicionales, basados en inhibidores químicos como nitratos y fosfatos, evolucionaron hacia soluciones más ecológicas, como los inhibidores verdes derivados de fuentes naturales. Entre estos, el uso de compuestos orgánicos como anticorrosivos despertó gran interés, gracias a sus propiedades anticorrosivas, biodegradabilidad y bajo impacto ambiental. Estos aditivos actuaron formando capas protectoras sobre la superficie del acero, bloqueando los procesos electroquímicos que impulsan la corrosión. Además, los avances en nanotecnología permitieron la incorporación de nanopartículas en recubrimientos y mezclas de concreto, mejorando su resistencia a los agentes corrosivos. Otro avance importante fue el desarrollo de aditivos multifuncionales que no solo inhibieron la corrosión, sino que también mejoraron las propiedades mecánicas y la trabajabilidad del concreto. La combinación de tecnologías avanzadas y estrategias sostenibles promovió un cambio hacia sistemas de protección más eficientes, económicos y respetuosos con el medio ambiente. Este artículo revisó los avances recientes, las limitaciones actuales y las oportunidades futuras en el uso de aditivos anticorrosivos para el acero de refuerzo.

Palabras clave: Aditivos anticorrosivos, Acero de refuerzo, Anticorrosives, Nanotecnología, Sostenibilidad.

I. Introducción

Este artículo está organizado en cinco secciones: introducción, metodología, resultados, discusión y conclusiones, con el fin de garantizar una estructura lógica y coherente que guíe al lector en la comprensión del análisis presentado.

La corrosión del acero de refuerzo es un desafío crítico en la ingeniería de materiales y en la construcción de infraestructuras de concreto. Este fenómeno, impulsado principalmente por reacciones electroquímicas entre el metal y su entorno, compromete la durabilidad y seguridad estructural, además de generar elevados costos en mantenimiento, reparaciones y reemplazos. En este contexto, el desarrollo de aditivos anticorrosivos para mitigar la corrosión se ha convertido en un área de investigación prioritaria, marcando un punto de convergencia entre las necesidades de la industria y las demandas por soluciones sostenibles.

Tradicionalmente, los sistemas de protección han recurrido a inhibidores químicos como nitratos, fosfatos y otros compuestos sintéticos. Sin embargo, la búsqueda de alternativas más eficientes, económicas y respetuosas con el medio ambiente ha impulsado la exploración de nuevos materiales y tecnologías. Entre estas, destacan los inhibidores verdes, derivados de fuentes naturales, que ofrecen propiedades Anticorrosivos tes con un impacto ambiental reducido, y los avances en nanotecnología, que han permitido la incorporación de nanopartículas en recubrimientos y mezclas de concreto para mejorar la protección contra agentes corrosivos.

Además de prevenir la oxidación, los aditivos más recientes buscan cumplir funciones adicionales, como mejorar la trabajabilidad del concreto y reforzar sus propiedades mecánicas. Este enfoque multifuncional refleja la tendencia hacia soluciones integrales que optimicen el desempeño estructural al tiempo que reducen costos y extienden la vida útil de las construcciones. En este artículo de revisión, se presentan los avances recientes en la fabricación de aditivos Anticorrosivos tes, analizando sus mecanismos de acción, aplicaciones prácticas, limitaciones actuales y el potencial de las tecnologías emergentes en este campo.

En estudios donde se evalúa la eficacia del extracto de hojas de *Syzygium polyanthum* como inhibidor de corrosión para acero al carbono en ácido clorhídrico 1.0 Molar. a una concentración de 2000 ppm, alcanzó una eficiencia del 94.65 ± 0.94%, según resultados electroquímicos. Los análisis de superficie mostraron que, sin inhibidor, el acero sufría corrosión severa, mientras que el *Syzygium polyanthum*

formaba una película protectora mediante adsorción de compuestos bioactivos como polifenoles y flavonoides [1].

La eliminación de inhibidores de corrosión tóxicos, como los basados en cromo hexavalente, ha motivado la búsqueda de compuestos orgánicos más seguros y sostenibles. Avances en la síntesis orgánica, pruebas aceleradas, aprendizaje automático (ML) y modelos de relación estructura-propiedad (QSPR) han transformado el desarrollo de inhibidores. Estas herramientas permiten predecir la eficacia de nuevos materiales no sintetizados, estableciendo un paradigma para el descubrimiento rápido y eficiente de inhibidores efectivos para diversos metales y aleaciones [2].

Este estudio se centra en la síntesis y caracterización de hidróxidos dobles laminares (LDHs) de Zn-Al-$PO4^{3-}$ y Zn-Al-$NO3^{-}$ utilizando técnicas como microscopía electrónica de barrido con emisión de campo (FE-SEM), espectroscopía de dispersión de energía (EDS) y espectroscopía de fotoelectrones de rayos X (XPS). Se evaluó la capacidad de liberación controlada de los inhibidores mediante pruebas de espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS), polarización y análisis de superficie en solución de cloruro de sodio (NaCl) al 3.5 %. Un sistema de recubrimiento de dos capas, compuesto por un imprimador de silano con hidróxidos dobles laminares (LDHs) y una capa superior de epoxi-poliamida, fue aplicado sobre acero. Los resultados demostraron que la adición de Zn-Al-$PO4^{3-}$ LDH al recubrimiento de silano proporciona una inhibición eficiente al liberar aniones $PO4^{3-}$ a través de un proceso de intercambio iónico [3].

El concreto reforzado es el material más utilizado en la industria de la infraestructura, pero su durabilidad está gravemente comprometida por la corrosión del acero de refuerzo, causada principalmente por el ataque de cloruros o la carbonatación del concreto. Entre las técnicas para mejorar el desempeño del concreto, el uso de inhibidores de corrosión destaca por su bajo costo y facilidad de aplicación. Este artículo ofrece una revisión crítica de los mecanismos de protección que brindan los inhibidores de corrosión, destacando la necesidad de desarrollar alternativas no tóxicas y sostenibles debido a las regulaciones ambientales más estrictas. Además, se compara la efectividad y versatilidad de los inhibidores verdes frente a los sintéticos, abordando sus ventajas en términos de sostenibilidad y menores impactos tóxicos. Este análisis busca fomentar una comprensión más profunda de los mecanismos de protección y promover el uso de materiales innovadores y ecológicos para extender la vida útil del concreto reforzado con acero [4].

Los polímeros han demostrado ser una alternativa efectiva a los inhibidores de corrosión tóxicos convencionales, gracias a su capacidad de adsorberse en superficies metálicas mediante sus sitios donadores ricos en electrones, proporcionando una excelente cobertura y protección. Aunque los polímeros naturales se promueven por su carácter biodegradable y amigable con el medio ambiente, su desempeño puede verse comprometido en condiciones extremas, como altas temperaturas o concentraciones de electrolitos. Además, su extracción y procesamiento suelen ser costosos y complejos. En este contexto, los polímeros sintéticos biodegradables (BDSPs) han surgido como una solución sostenible para la protección contra la corrosión. Este informe analiza el potencial de los BDSPs en la inhibición de la corrosión, abordando sus ventajas, desafíos y su papel en la mitigación sostenible de la corrosión, destacando su relevancia en la ciencia de materiales y el desarrollo de tecnologías ecológicas [5].

Los inhibidores orgánicos, especialmente heterociclos, han surgido como alternativas eficientes y económicas frente a los inhibidores inorgánicos tóxicos. Sin embargo, sus limitaciones ambientales han impulsado el desarrollo de opciones sostenibles, como extractos vegetales, polímeros naturales, aminoácidos y carbohidratos, gracias a su biodegradabilidad y baja toxicidad. Técnicas sintéticas verdes, como irradiación por microondas y ultrasonido, han mejorado la eficacia de los inhibidores, mientras que modelos computacionales como teoría del funcional de la densidad (DFT) y simulaciones moleculares optimizan los recursos al reducir ensayos experimentales. Métodos innovadores como la autocuración y el sinergismo completan las estrategias sostenibles para la prevención de la corrosión [6].

La corrosión del acero al carbono ha impulsado el interés en inhibidores sostenibles, destacando los extractos vegetales por sus beneficios económicos, ambientales y de seguridad. Este estudio analiza mecanismos de adsorción, técnicas de caracterización y factores que afectan la eficiencia de los inhibidores basados en plantas, enfatizando la necesidad de tecnologías que aíslen compuestos bioactivos para optimizar su uso y reducir el desperdicio en procesos de inhibición [7].

Esta revisión aborda los inhibidores de corrosión basados en biomasa y su aplicación en la protección de metales en entornos agresivos, destacando métodos convencionales y no convencionales de extracción de biomasa. Aunque los inhibidores industriales tradicionales son tóxicos y dañinos para el medio ambiente, los extractos de biomasa han demostrado una alta eficiencia en medios ácidos, alcalinos y con cloruros. Esto se debe a la presencia de grupos funcionales activos, como compuestos heterocíclicos de nitrógeno, azufre y oxígeno, que forman capas protectoras al adsorberse en la superficie del metal. A pesar de los avances experimentales, los inhibidores verdes siguen siendo objeto de debate [8].

Los derivados de Perimidin-10-one son inhibidores de corrosión ecológicos efectivos para proteger el acero de refuerzo en medios ácidos. Este estudio evaluó el impacto de dos compuestos en ácido clorhídrico (2 M) mediante técnicas como polarización de Tafel, espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS), modulación de frecuencia

electroquímica (EFM) y análisis teóricos (DFT) y dinámica molecular. A una concentración de 11×10^{-6} M y 55 °C, alcanzaron una eficiencia máxima de inhibición del 89.68 %, siguiendo isotermas de adsorción de Langmuir y Henry. Los resultados mostraron que ambos compuestos actúan como inhibidores mixtos y que el primer compuesto supera al segundo compuesto en efectividad [9].

La corrosión del acero de refuerzo constituye un desafío técnico crítico en la ingeniería civil, debido a su impacto en la durabilidad y seguridad de las estructuras de concreto, así como a los costos asociados con su reparación y mantenimiento. Este proceso electroquímico, promovido por la exposición a cloruros y dióxido de carbono, compromete la integridad estructural de las infraestructuras. Ante esta problemática, el desarrollo de inhibidores de corrosión sostenibles, como extractos vegetales y materiales bioactivos, ha cobrado relevancia como alternativa a los inhibidores químicos convencionales, al ofrecer alta eficiencia y menor impacto ambiental. Además, los avances en nanotecnología y materiales multifuncionales han permitido mejorar la protección contra agentes corrosivos, optimizando el desempeño estructural del concreto reforzado y promoviendo soluciones más sostenibles y rentables para la industria.

II. METODOLOGÍA

El presente artículo de revisión adopta un enfoque cualitativo, deductivo y explicativo, fundamentado en el análisis crítico de literatura científica relevante. Se realizó una búsqueda sistemática en bases de datos indexadas, incluyendo Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink y SciELO, empleando palabras clave como "corrosión del acero de refuerzo", "inhibidores de corrosión verdes" y "aditivos sostenibles". Se consideraron únicamente artículos publicados entre 2005 y 2025 en revistas científicas revisadas por pares. La selección de los estudios tuvo en cuenta la diversidad geográfica, temporal y metodológica, con el objetivo de garantizar un enfoque amplio y representativo. Los artículos seleccionados se categorizaron según el tipo de inhibidores, mecanismos de acción, aplicaciones prácticas y avances tecnológicos recientes. El análisis se centró en comparar las eficiencias reportadas, identificar limitaciones y destacar tendencias emergentes en el desarrollo de materiales sostenibles para la protección contra la corrosión.

A. Tipo de estudio

En el marco de esta investigación, se desarrolló una revisión sistemática de la literatura científica utilizando la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) [10]. Este enfoque se empleó por su reconocido rigor metodológico y su capacidad para garantizar la transparencia, reproducibilidad y exhaustividad en el proceso de recopilación, selección y análisis de información relevante. La aplicación de PRISMA permite no solo estructurar de manera clara cada etapa del estudio, desde la identificación de fuentes hasta la síntesis de resultados, sino también asegurar que los hallazgos sean sólidos y estén respaldados por evidencia científica de calidad.

B. Estrategia de búsqueda y criterios de selección

Se seleccionaron artículos de bases de datos científicas indexadas en inglés, publicados entre 2005 en adelante, con estructura estándar de Introducción, metodología, resultados y discusión (IMRD), que abordaron sobre los progresos recientes en la fabricación de aditivos como Anticorrosivos tes del acero de refuerzo. Para ello, se consultaron bases de datos nacionales e internacionales que cumplieran estos criterios.

C. Criterios de inclusión y exclusión

Los estudios seleccionados cumplieron con criterios de inclusión específicos, como estar publicados en revistas indexadas entre los años 2005 y 2025, enfocarse en la aplicación de inhibidores naturales (mucílagos, extractos vegetales) o sintéticos en acero de refuerzo, y reportar resultados cuantitativos sobre métodos de evaluación de corrosión. Se excluyeron trabajos que no contenían datos suficientes, no eran replicables o no se centraban en acero de refuerzo. Además, se descartaron investigaciones enfocadas en materiales distintos al concreto reforzado.

D. Proceso de selección de estudios

El proceso de selección se llevó a cabo en tres etapas. En la primera, se identificaron artículos relevantes a partir de los títulos y resúmenes. En la segunda etapa, se revisaron los textos completos para verificar su cumplimiento con los criterios de inclusión. Finalmente, se incluyeron aquellos estudios que presentaron diseños experimentales sólidos y resultados claros.

E. Extracción de datos

De cada estudio seleccionado se extrajeron datos clave, tales como el tipo de anticorrosivo evaluado (natural o sintético), las concentraciones utilizadas, los métodos de evaluación (estadísticas, potencial de corrosión, eficacia entre otros), las condiciones experimentales (temperatura, pH, entre otros) y sobre todo los resultados principales, como la eficacia del inhibidor y el porcentaje de inhibición logrado. Los datos fueron organizados en tablas comparativas para facilitar el análisis y la interpretación.

F. Evaluación de calidad y análisis de datos

Se evaluó la calidad de los estudios considerando su diseño experimental, claridad metodológica, uso de controles y análisis estadísticos. Solo se incluyeron investigaciones reproducibles y confiables. Los datos se analizaron cualitativa y cuantitativamente, identificando patrones y comparando la eficacia de inhibidores naturales y sintéticos según variables como temperatura, concentración y durabilidad. Los resultados se presentaron en gráficos y tablas para facilitar su interpretación.

III. RESULTADOS

Los resultados obtenidos en esta revisión sistemática destacan los avances en el uso de anticorrosivos naturales y sintéticos para acero de refuerzo. Los inhibidores naturales, basados en extractos vegetales y compuestos bioactivos, ofrecen soluciones sostenibles con eficiencias variables, mientras que los sintéticos, diseñados con nanotecnología y materiales híbridos, logran mayores niveles de protección en condiciones extremas. A continuación, se presentan los principales hallazgos, organizados en función de la eficacia de los inhibidores.

Tabla 1
Principales hallazgos sobre anticorrosivos naturales

Autor	Año	Método de evaluación	Resultados destacados
[1]	2024	Se analizó cualitativa y cuantitativamente, capacidad anticorrosiva de extracto de hojas de *Syzygium polianthum.*	En un rango de temperatura (25 a 35°C), es inhibidor eficiente de la corrosión del acero
[6]	2024	Se analizo materiales de origen biológico, extractos de plantas, polímeros naturales, las gomas, desechos, aminoácidos y carbohidratos como inhibidoras de corrosión.	Demostraron que los materiales biológicos, extracto de plantas, gomas son una alternativa más eficiente, rentables y práctico.
[7]	2023	El estudio se examina los mecanismos de adsorción, las técnicas de caracterización y los factores que afectan la eficiencia de inhibición de corrosión con vegetales, teniendo en cuenta las consideraciones económicas y ambientales.	La investigación determina la eficacia de extractos vegetales, actuando éstas como anticorrosivos de aceros además aprovechar el potencial del extracto de plantas para alcanzar desarrollo sostenible, consumo y producción responsable.
[11]	2006	Estudia el efecto inhibidor del extracto de semillas de Khillah (*Ammi visnaga*) sobre corrosión del acero, a través de la técnica potenciostática y pérdida de peso.	La presencia del extracto reduce la tasa de corrosión del acero, además la eficiencia incrementa conforme se aumenta la concentración del extracto, también la temperatura.
[12]	2020	Se estudio la capacidad anticorrosiva del líquido iónico polimérico derivado del imidazol (polibromuro de 3-butil-1-vinilimidazol-PIL), a través de la metodología espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS), microscopia electrónica de barrido (SEM) y calculo químico cuántico.	Se desprende que el grado de corrosión de la superficie del acero dulce disminuye con el aumento de la concentración del PIL, coincidiendo con los cálculos químicos cuánticos en los resultados experimentales, la eficacia de inhibición del PIL superó el 96%.
[13]	2021	Se estudio el extracto de *Stylosanthes gracilis* como inhibidor de la corrosión de acero en ácido sulfúrico, mediante método de pérdida de peso y polarización potenciodinámica.	Se observo la acción del inhibidor es de tipo mixto, tanto el método de pérdida de peso y polarización potenciodinámica identificaron 1,2 g/L como la concentración optima.
[14]	2022	Se ha investigado la capacidad inhibidora de la corrosión del aceite esencial de frutas de *Cupressus arizónica* en ácido clorhídrico a través de la técnica electroquímica como la polarización potenciodinámica (PDP), espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) y microscopia de barrido (SEM).	Elevadas temperaturas mostraron efecto negativo en la eficiencia de la corrosión del inhibidor. A 323 K la capacidad anticorrosiva redujo al 77%. Además, las pruebas de SEM mostraron que el inhibidor formo una barrer protectora que evita la corrosión del acero al carbono.

La tabla 01 muestra una diversidad de métodos y materiales utilizados recientemente para evaluar la capacidad anticorrosiva en aceros, destacando tanto extractos de plantas como compuestos sintéticos. Los estudios recientes confirman que los extractos vegetales, como los de *Syzygium polianthum* y *Stylosanthes gracilis*, así como materiales biológicos y aceites esenciales, demuestran eficiencia significativa como inhibidores de la corrosión en diferentes condiciones y medios ácidos, alcanzando eficiencias óptimas cuando se ajusta la concentración del inhibidor y bajo ciertas condiciones de temperatura ([1], [6], [13], [14]). Además, se evidencia que factores como el aumento de la temperatura pueden reducir la efectividad del inhibidor, aunque el uso de tecnologías avanzadas como líquidos iónicos poliméricos permite alcanzar eficiencias superiores al 96%, validando los resultados tanto experimental como computacionalmente ([12], [14]). Asimismo, la evaluación con diferentes técnicas electroquímicas y de pérdida de peso respalda la acción inhibitoria de estos compuestos, mostrando que los materiales naturales no solo son efectivos sino también sostenibles y económicamente viables, contribuyendo al desarrollo de soluciones más responsables y sostenibles en la protección contra la corrosión ([6], [7]).

La evidencia reciente apunta a que tanto los extractos de origen vegetal como algunos polímeros avanzados representan alternativas prometedoras y sostenibles para inhibir la corrosión del acero, aunque es fundamental considerar variables como la temperatura y concentración para maximizar su eficacia.

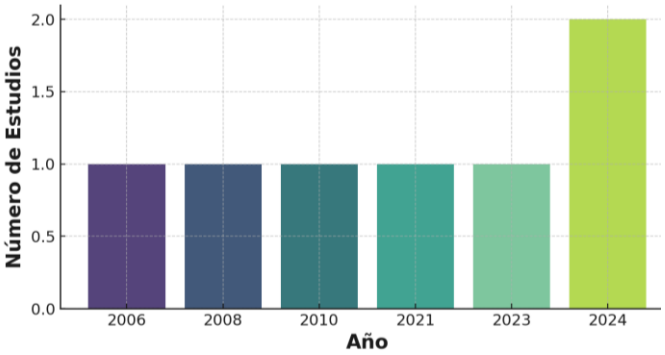

Fig. 1
Numero de estudios realizados por año

La figura 1 muestra la evolución en el número de estudios publicados por año sobre inhibidores de corrosión, evidenciando una tendencia estable entre 2006 y 2023, con aproximadamente un estudio anual, y un incremento notable en 2024, donde la cantidad de investigaciones casi se duplica respecto a años anteriores. Este aumento reciente sugiere un creciente interés y actividad en la temática, posiblemente impulsado por la necesidad de soluciones sostenibles y el avance en tecnologías y metodologías de evaluación.

Tabla 2
Principales hallazgos sobre anti corrosivos Sintéticos

Autor	Año	Método de evaluación	Resultados destacados
[20]	2024	Se evaluó el hidróxido doble laminar de cerio y nikel (CeNiLDH) con un complejo de nanopartículas de pentóxido de vanadio (V_2O_5) y ácido fumárico (2E)-but-2-enedioico, en una capa de óxido de magnesio.	El compuesto químico hibrido aplicado en el acero creó una estructura de capa que suprime eficazmente la corrosión.
[21]	2017	Se estudio los micro-nano rellenos de hidróxidos dobles en capas de óxido de grafeno reducido -zinc-aluminio (rGO-ZnAl-LDH), se investigó mediante curvas de polarización.	Los rellenos micro-nano de hidróxidos dobles en óxidos de grafeno reducido en Zinc – Aluminio tienen propiedades anticorrosivas superiores con las resinas epoxi a base de agua.
[22]	2025	Estudio el comportamiento anticorrosivo de un recubrimiento de poliuretano que contiene pigmento hibrido de atapulgita, a traves de la metodología de microscopio electrónico de barrido (SEM).	Los resultados muestran que se presentó una tasa de liberación del 97.5% a pH=3, mejorando la resistencia a la corrosión de los revestimientos.
[23]	2024	Estudia el recubrimiento anticorrosivo biomimeticos a base de agua, microgel de goma arábiga.	Los recubrimientos demuestran una mejor resistencia al agua, una mayor resistencia a la abrasión y una protección activa contra la corrosión.
[24]	2024	Se estudio nanopartículas libres de flúor para recubrimientos epóxicos superhidrofobico, auto limpiantes y anticorrosivos para la protección del acero en el medio marino.	Los recubrimientos de epoxi superhidrofobios minimizaron significativamente el área de contacto del acero y el medio corrosivo, beneficiando incremento de tres veces la resistencia a la corrosión.
[25]	2025	La aplicación de nanofibras y sus compuestos como anticorrosivas, usando como recubrimientos protectores de polímeros.	El recubrimiento con autorreparadores del acero en medio marino se ha observado que el rendimiento mejora con nanofibras modificadas por pH.

La tabla 2 evidencia los avances recientes en el desarrollo de recubrimientos y compuestos híbridos para la protección anticorrosiva del acero, destacando el uso de materiales avanzados como hidróxidos dobles laminares, nanopartículas, pigmentos híbridos y microgeles. Los resultados muestran que estos nuevos recubrimientos, tanto sintéticos como de inspiración biomimética, logran mejorar significativamente la resistencia a la corrosión, ya sea mediante la creación de barreras físicas, la reducción del contacto con agentes corrosivos, o la introducción de propiedades adicionales como la autorreparación y la superhidrofobicidad. Es relevante resaltar que varias de estas tecnologías, como los recubrimientos epóxicos superhidrofóbicos y los microgeles de goma arábiga, ofrecen no solo protección activa contra la corrosión sino también mejoras en la resistencia al agua y la abrasión, demostrando la tendencia actual hacia soluciones multifuncionales y ambientalmente más sostenibles para la protección de metales en entornos agresivos, especialmente marinos.

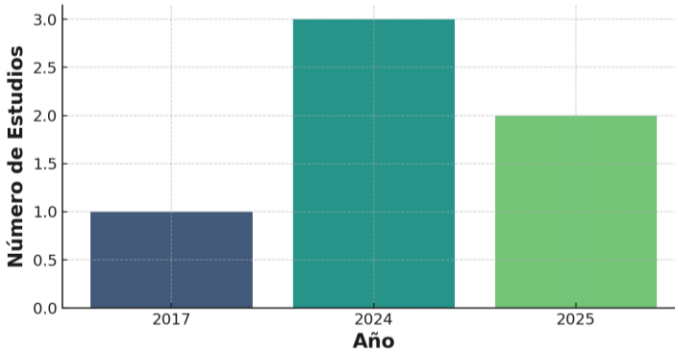

Fig. 2
Numero de estudios realizados en los últimos años

La figura 2 muestra la distribución anual del número de estudios publicados sobre recubrimientos avanzados

anticorrosivos en los años 2017, 2024 y 2025. Se observa un notable incremento en la producción científica en 2024, alcanzando el máximo de tres estudios, lo que representa un aumento del 200% respecto a 2017. Aunque en 2025 el número de publicaciones disminuye ligeramente a dos estudios, este valor sigue siendo significativamente mayor que el registrado en 2017, indicando una tendencia creciente y sostenida en el interés y desarrollo de nuevas tecnologías anticorrosivas en los últimos años. Este comportamiento estadístico sugiere que la investigación en el área ha cobrado mayor relevancia recientemente, probablemente por la búsqueda de soluciones más innovadoras y eficientes frente a la corrosión.

Los inhibidores naturales y sintéticos presentan diferencias clave en eficiencia y aplicación. Los naturales, como extractos vegetales, destacan por su sostenibilidad y eficiencias que alcanzan hasta un 96%, pero su desempeño puede variar según factores como temperatura y concentración. Mientras tanto, los sintéticos, como recubrimientos con nanopartículas y polímeros avanzados, logran eficiencias superiores al 97%, ofreciendo protección más consistente y adaptable a condiciones extremas. Aunque los naturales son una alternativa ecológica, los sintéticos sobresalen en aplicaciones demandantes por su alta resistencia y durabilidad. Un gráfico comparativo evidencia estas diferencias en cuanto a la eficacia de ambos corrosivos.

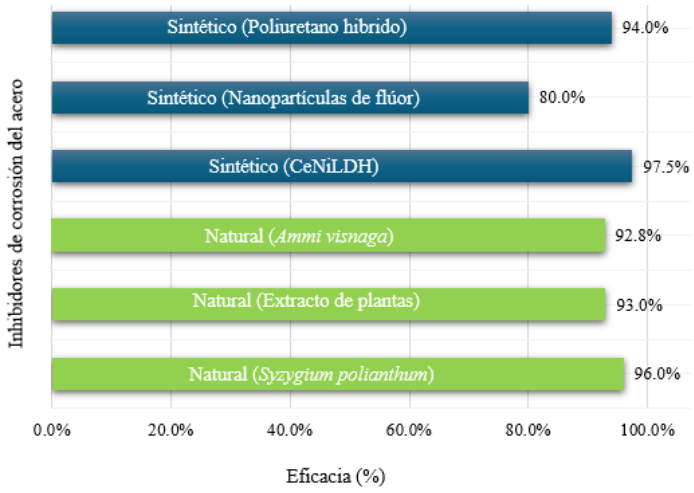

Fig. 3
Eficacia de anticorrosivos naturales y sintéticos

La figura 3 compara la eficacia de diferentes inhibidores de corrosión del acero, diferenciando entre inhibidores sintéticos y naturales. Se observa que tanto los inhibidores sintéticos como los naturales alcanzan eficacias superiores al 90% en la mayoría de los casos. El inhibidor sintético basado en CeNiLDH muestra la mayor eficacia (97.5%), seguido por el inhibidor natural de *Syzygium polianthum* (96.0%), el extracto de plantas (93.0%) y el natural de *Ammi visnaga* (92.8%). El poliuretano híbrido, también sintético, destaca con una eficacia del 94.0%. Sin embargo, las nanopartículas de flúor, aunque sintéticas, presentan la menor eficacia registrada (80.0%). Estadísticamente, se aprecia que los inhibidores naturales no solo igualan, sino que incluso superan a algunos de los sintéticos en términos de rendimiento, lo que resalta su potencial competitivo como alternativas sostenibles. En general, la distribución de eficacias es alta, con un rango que va del 80% al 97.5%, indicando que la mayoría de las opciones evaluadas ofrecen una protección significativa contra la corrosión del acero.

Discusión.- Los principales hallazgos en cuanto a la eficacia de inhibidores naturales bajo diferentes metodologías y condiciones, sin embargo, sobre los anticorrosivos naturales menciona [15] donde utiliza residuos sólidos de té de una fábrica para preparar un inhibidor anticorrosivo verde, el extracto se preparó usando metodología convencional y se caracterizó mediante cromatografías liquida – espectroscopia de masas; donde el rendimiento de inhibición se evaluó sobre el acero mediante técnicas electroquímicas, encontró que el incremento de extracto de residuos de té, aumenta la eficiencia de inhibición de corrosión del acero, además [16] estudia la capacidad anticorrosiva del extracto de raíz de *Biebersteinia multífida* en un medio de ácido clorhídrico 2.0 M en acero de refuerzo, evaluó a través de la metodología de análisis microscopía electrónica de barrido donde obtuvo resultados de la eficiencia inhibitoria de la corrosión disminuye con el aumento de temperatura, además la eficacia inhibitoria máxima es a una concentración de 1 g/L de extracto, alcanzando 92.8% a 298.15 K. incrementando luego de 24 horas a 95.3%. Así mismo [17], [18] mencionan luego de haber realizado estudios sobre la capacidad anticorrosiva en acero con *Solanum sarattense* en 500 mg/L en un medio de ácido sulfúrico 0.5 M, obteniendo 93% de eficacia, similar a [18] estudio el extracto de regaliz en medio alcalino de cloruro de sodio 0.5 M, su capacidad anticorrosiva en acero alcanzó un 80 % de eficacia; también [19] realiza estudios sobre la inhibición de corrosión del acero al carbono en soluciona de ácido clorhídrico mediante extractos acuosos de cascaras de frutas, evaluando mediante la metodología de espectroscopia de impedancia electroquímica, donde obtuvo que el extracto acuoso de cascara de mango, naranja, maracuyá y anacardo en diferentes concentraciones y estos actúan como buenos inhibidores de la corrosión aumentando la concentración y reduciendo la temperatura.

Los estudios de anticorrosivos sintéticos e híbridos presenta resultados favorables como anticorrosivos del acero de refuerzo, estudios como [26] demuestran que incluso los biopolímeros marinos en pinturas y recubrimientos anticorrosivos son eficaces. Por otra parte [27] menciona que un recubrimiento anticorrosivo a base de polisiloxano con buena estabilidad química, tienen resistencia a la corrosión a largo plazo, probándose luego de la inmersión de 15 días. [28] también demuestra que 1,2,3-triazolil-acridina se estudiaron

como inhibidores de corrosión para acero dulce en medios ácidos, mostraron una eficiencia de anticorrosiva del 85 al 94% a 1 mmol/L a (298 K). además [29] estudió al grafeno como anticorrosivo del acero, donde ha observado que el grafeno posee propiedades de barrera que inhibe la penetración de agentes corrosivos como el agua, el oxígeno, iones de cloruro, entre otros. De tal manera se comporta como buen anticorrosivo del acero. Por otra parte, es estudio de anticorrosivos híbridos como el epoxi de magnetita/grafenos modificados con líquidos iónicos, mejora la respuesta anticorrosiva con 5% de adición [30].

Del análisis de resultados de múltiples investigaciones realizadas con extractos de plantas naturales, se observa la eficacia de inhibición de la corrosión del acero, debido a los compuestos bioquímicos, polifenoles, alcaloides, saponinas, terpenoides, ácidos orgánicos, mucilagos que contienen polisacáridos y compuestos fenólicos y otros metabolitos bioactivos que pueden formar una capa protectora sobre la superficie del acero de refuerzo, bloqueando los procesos de oxidación y reducción.

En cuanto a la eficacia de los inhibidores, los estudios analizados evidencian que los anticorrosivos naturales, presentan niveles de inhibición comparables a los inhibidores sintéticos bajo condiciones específicas. Sin embargo, se observan variaciones significativas según la concentración y la temperatura de los ensayos, sumado a ello respecto las características que tienen los anticorrosivos naturales como en el aspecto económico favorable y además en cuanto a las contribuciones con el medio ambiente totalmente contrario a los anticorrosivos sintéticos y convencionales.

IV. Conclusiones

En cuanto a la eficacia de los anticorrosivos naturales y sintéticos, se concluye que los resultados de la revisión evidencian que los anticorrosivos naturales, como los extractos de plantas, muestran una eficacia comparable a la de los inhibidores sintéticos bajo condiciones específicas, con eficiencias reportadas de hasta un 96% en estudios controlados. Los compuestos bioquímicos presentes en estos extractos, como polifenoles, alcaloides, saponinas, terpenoides, ácidos orgánicos y mucílagos, desempeñan un papel clave en la formación de barreras protectoras sobre el acero, reduciendo los procesos de oxidación y corrosión. En el caso de los inhibidores sintéticos, el desarrollo de recubrimientos avanzados, como nanopartículas y biopolímeros, ofrece propiedades de barrera mejoradas y autorreparación, lo que incrementa la resistencia a la corrosión, alcanzando eficiencias de hasta el 97.5% en condiciones extremas.

En cuanto al impacto de las condiciones experimentales, tanto para los inhibidores naturales como para los sintéticos, se observa que la eficacia depende significativamente de factores como la concentración y la temperatura. Los estudios resaltan que los inhibidores naturales son más sensibles a las altas temperaturas, reduciendo su eficacia hasta un 77% en pruebas realizadas a 323 K. En contraste, algunos inhibidores sintéticos, como los recubrimientos epóxidos superhidrofóbicos y las nanofibras modificadas, mantienen su eficacia incluso en condiciones extremas, mostrando incrementos de hasta tres veces en la resistencia a la corrosión en medios agresivos.

Respecto a la contribución ambiental y económica, los anticorrosivos naturales destacan por ser una alternativa económica, sostenible y ambientalmente amigable en comparación con los sintéticos. Esto los posiciona como una solución viable en industrias que priorizan el desarrollo sostenible y la producción responsable. Sin embargo, su adopción generalizada requiere optimizaciones en su desempeño a temperaturas elevadas y estudios a largo plazo para validar su durabilidad.

Respecto a las tendencias y avances tecnológicos, la investigación en anticorrosivos sintéticos e híbridos se centra en el desarrollo de materiales avanzados, como recubrimientos con nanopartículas, líquidos iónicos y biopolímeros marinos, que ofrecen propiedades multifuncionales, como resistencia al agua, protección activa contra la corrosión y autorreparación. Estos avances tecnológicos apuntan a soluciones más eficientes, pero su implementación puede verse limitada por costos más elevados y una mayor huella ambiental en comparación con los inhibidores naturales.

En cuanto a las perspectivas futuras, los inhibidores naturales tienen un gran potencial para ser optimizados y escalados industrialmente, especialmente en sectores donde la sostenibilidad es una prioridad. Por otro lado, la investigación en inhibidores híbridos y recubrimientos biomiméticos promete unir las ventajas de ambos tipos de anticorrosivos, combinando sostenibilidad y alta eficacia, alcanzando eficiencias de hasta un 96-98% en condiciones óptimas.

Agradecimiento/Reconocimiento

Expresamos nuestro más profundo agradecimiento a la Universidad Nacional Federico Villarreal (UNFV), cuna de saber y formación de profesionales íntegros, por habernos brindado las herramientas académicas y humanas necesarias para enfrentar los desafíos de la vida profesional. La excelencia de su enseñanza y su compromiso con el desarrollo académico y social dejan una huella imborrable en todos quienes tenemos el privilegio de formar parte de su legado.

Referencias

[1] K. D. H. Nguyen, T. D. Manh, L. T. P. Nguyen, D. T. Vu, and K. L. Duong Ngo, “Syzygium polyanthum (Wight) Walp. leaf extract as a

sustainable corrosion inhibitor for carbon steel in hydrochloric acidic environment," Journal of Industrial and Engineering Chemistry, vol. 143, pp. 468–487, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.jiec.2024.08.054.
[2] D. A. Winkler et al., "Impact of inhibition mechanisms, automation, and computational models on the discovery of organic corrosion inhibitors," Prog Mater Sci, vol. 149, p. 101392, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.pmatsci.2024.101392.
[3] E. Alibakhshi, E. Ghasemi, M. Mahdavian, and B. Ramezanzadeh, "A comparative study on corrosion inhibitive effect of nitrate and phosphate intercalated Zn-Al- layered double hydroxides (LDHs) nanocontainers incorporated into a hybrid silane layer and their effect on cathodic delamination of epoxy topcoat," Corros Sci, vol. 115, pp. 159–174, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.corsci.2016.12.001.
[4] A. Rawat, S. R. Karade, and P. C. Thapliyal, "Mechanism of inhibitors in control of corrosion of steel in concrete," Mater Today Proc, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.06.210.
[5] C. Verma, M. A. Quraishi, A. Alfantazi, and K. Y. Rhee, "Biodegradable synthetic polymers in sustainable corrosion protection: Present and future scenarios," Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, vol. 6, no. 4, pp. 407–435, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.aiepr.2023.04.005.
[6] C. Verma et al., "Principles and theories of green chemistry for corrosion science and engineering: design and application," Green Chemistry, vol. 26, no. 8, pp. 4270–4357, 2024, doi: 10.1039/D3GC05207A.
[7] R. O. Medupin, K. O. Ukoba, K. O. Yoro, and T.-C. Jen, "Sustainable approach for corrosion control in mild steel using plant-based inhibitors: a review," Materials Today Sustainability, vol. 22, p. 100373, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.mtsust.2023.100373.
[8] C. N. Njoku et al., "A review of the extraction and application of eco-friendly biomass for corrosion protection of metals," Results Chem, vol. 7, p. 101286, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.rechem.2023.101286.
[9] H. S. Gadow, A. A. Alayyafi, T. A. Farghaly, and A. M. Eldesoky, "Corrosion inhibition properties of perimidin-10-one derivatives for steel reinforcement in acidic environments: Experimental and theoretical insights," Int J Electrochem Sci, vol. 19, no. 5, p. 100545, May 2024, doi: 10.1016/j.ijoes.2024.100545.
[10] D. Moher, "Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement," Ann Intern Med, vol. 151, no. 4, p. 264, Aug. 2009, doi: 10.7326/0003-4819-151-4-200908180-00135.
[11] A. Y. El-Etre, "Khillah extract as inhibitor for acid corrosion of SX 316 steel," Appl Surf Sci, vol. 252, no. 24, pp. 8521–8525, Oct. 2006, doi: 10.1016/j.apsusc.2005.11.066.
[12] E. Kamali Ardakani, E. Kowsari, and A. Ehsani, "Imidazolium-derived polymeric ionic liquid as a green inhibitor for corrosion inhibition of mild steel in 1.0 M HCl: Experimental and computational study," Colloids Surf A Physicochem Eng Asp, vol. 586, p. 124195, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.colsurfa.2019.124195.
[13] O. D. Ofuyekpone, O. G. Utu, B. O. Onyekpe, and A. A. Adediran, "Effect of inhibitor concentration on the potency of stylosanthes gracilis extract as corrosion inhibitor for AISI 304l in sulphuric acid solution," Sci Afr, vol. 11, p. e00714, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.sciaf.2021.e00714.
[14] S. Cherrad et al., "Cupressus arizonica fruit essential oil: A novel green inhibitor for acid corrosion of carbon steel," Arabian Journal of Chemistry, vol. 15, no. 6, p. 103849, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.arabjc.2022.103849.
[15] A. Pal and C. Das, "A novel use of solid waste extract from tea factory as corrosion inhibitor in acidic media on boiler quality steel," Ind Crops Prod, vol. 151, p. 112468, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.indcrop.2020.112468.
[16] M. Khayatkashani et al., "Insight into the corrosion inhibition of Biebersteinia multifida root extract for carbon steel in acidic medium," Science of The Total Environment, vol. 836, p. 155527, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.155527.
[17] R. Haldhar, D. Prasad, I. Bahadur, O. Dagdag, and A. Berisha, "Evaluation of Gloriosa superba seeds extract as corrosion inhibition for low carbon steel in sulfuric acidic medium: A combined experimental and computational studies," J Mol Liq, vol. 323, p. 114958, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.molliq.2020.114958.
[18] R. Naderi, A. Bautista, F. Velasco, M. Soleimani, and M. Pourfath, "Use of licorice plant extract for controlling corrosion of steel rebar in chloride-polluted concrete pore solution," J Mol Liq, vol. 346, p. 117856, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.molliq.2021.117856.
[19] J. C. da Rocha, J. A. da Cunha Ponciano Gomes, and E. D'Elia, "Corrosion inhibition of carbon steel in hydrochloric acid solution by fruit peel aqueous extracts," Corros Sci, vol. 52, no. 7, pp. 2341–2348, Jul. 2010, doi: 10.1016/j.corsci.2010.03.033.
[20] M. Kaseem, A. R. Safira, M. Aadil, T. T. Thanaa, and A. Fattah-alhosseini, "Developing an efficient anticorrosive system through advanced modification of plasma-electrolyzed MgO with CeNiLDH complexed with V_2O_5 nanoparticles and (2E)-But-2-enedioic acid," Journal of Magnesium and Alloys, vol. 12, no. 10, pp. 4205–4218, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.jma.2024.10.015.
[21] D. Yu et al., "RGO modified ZnAl-LDH as epoxy nanostructure filler: A novel synthetic approach to anticorrosive waterborne coating," Surf Coat Technol, vol. 326, pp. 207–215, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.surfcoat.2017.07.053.
[22] H. Xu, M. Ali, B. Wu, H. Shi, S. Gu, and E.-H. Han, "Anticorrosive behavior of polyurethane coating containing hybrid attapulgite pigment," Prog Org Coat, vol. 200, p. 109035, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.porgcoat.2024.109035.
[23] H. Shao et al., "Gum Arabic microgel–based biomimetic waterborne anticorrosive coatings with reinforced water and abrasive resistances," Carbohydr Polym, vol. 342, p. 122408, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.carbpol.2024.122408.
[24] K. K. Veedu, T. P. Kalarikkal, N. Jayakumar, and N. Karimbintherikkal Gopalan, "Fluorine free nanoparticles for superhydrophobic, self-cleaning, and anticorrosive epoxy coatings for steel protection in marine medium," Results in Surfaces and Interfaces, vol. 14, p. 100195, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.rsurfi.2024.100195.
[25] O. Dagdag, R. Haldhar, E. Berdimurodov, and H. Kim, "Anticorrosive applications of nanofibers and their composites," in Polymeric Nanofibers and their Composites, Elsevier, 2025, pp. 357–376. doi: 10.1016/B978-0-443-14128-7.00014-6.
[26] P. P. Chavan, R. Roy, and A. J. Jadhav, "Potential role of marine biopolymers in paints and anticorrosive coatings," in Marine Biopolymers, Elsevier, 2025, pp. 769–804. doi: 10.1016/B978-0-443-15606-9.00025-5.
[27] C. Zhang, J. Liang, Y. Yang, B. Liu, C. Cheng, and C. Hu, "An anticorrosive coating based on polysiloxane with good chemical stability and long-term corrosion resistance," Mater Chem Phys, vol. 325, p. 129717, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.matchemphys.2024.129717.
[28] C. Machado Fernandes et al., "Experimental and theoretical evaluation of the anticorrosive proprieties of new 1,2,3-triazolyl-acridine derivatives," Arabian Journal of Chemistry, vol. 17, no. 1, p. 105401, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.arabjc.2023.105401.
[29] S. Mandal, S. Zamindar, M. Murmu, H. Hirani, and P. Banerjee, "Synthesis and anticorrosive application of graphene and graphene-based materials," in Smart Anticorrosive Materials, Elsevier, 2023, pp. 109–142. doi: 10.1016/B978-0-323-95158-6.00002-3.
[30] L. F. Calheiros Souto, B. G. Soares, R. R. Henriques, and J. Santos, "Enhancing anticorrosive performance of epoxy-based coatings using magnetite/graphene hybrids modified with ionic liquids," Prog Org Coat, vol. 190, p. 108412, May 2024, doi: 10.1016/j.porgcoat.2024.108412.