

Análisis de las técnicas novedales de protección contra la corrosión influenciada por microorganismos (MIC) en tuberías API 5L de acero al carbono: Estado del arte

Nicolás Nieto Rivera y Diego Alejandro Niño Portilla

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Metalúrgico

Director

Sergio Ismael Blanco Vásquez

Doctor en Ingeniería

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela De Ingeniería Metalúrgica Y Ciencia De Materiales

Bucaramanga

2021

Dedicatoria

Primeramente, a mi familia ya que son aquellas personas que me apoyaron incondicionalmente a continuar y seguir adelante durante este trayecto en la universidad. Una especial dedicatoria a mi mamá NANCY RIVERA PIEDRAHITA quien fue la que me impulso a superarme y siempre creyó en mis capacidades. Mi papá FABIO ENRIQUE NIETO PAVA por ser quien estuvo brindándome ese apoyo emocional que me ayudo a ser la persona de hoy en día. Finalmente, también dedico este trabajo a mi hermano CAMILO NIETO RIVERA, aunque tenemos nuestras diferencias, siempre estuvo ahí acompañándome y apoyándonos mutuamente durante los años que hemos vivido siendo estudiantes foráneos en la ciudad.

Igualmente dedico esta tesis a: Carlos Gómez, Thomas, Carlos “el rolo”, Sebas Bohórquez, Sneider, Luis Cogollo, Javi, Isa, Santiago “rolito”, Alejandro “Lewan”, Hellal, Nata, Silvia Matajira, Juan Da “el paisa”, Gustavito, Juan Pablo Bohórquez, Jonathan Guarín, Holmes, Laurita, Dianita y mi compañero de tesis Diego, ya que, aunque durante el transcurso por la universidad fueron muchas las personas que me brindaron su amistad, ellos fueron aquellos que me acompañaron y apoyaron tanto dentro como fuera de las aulas, y estuvieron en diferentes momentos de alegría vividos durante el camino transcurrido.

Finalmente, también dedico este trabajo a la selección de rugby UIS por brindarme diferentes momentos de alegría y a su vez de conocer varias amistades que me acogieron y me aconsejaron durante la vida universitaria.

Nicolás Nieto Rivera

Dedicatoria

Inicialmente doy gracias a Dios por permitirme llegar hasta acá ... y dedico este trabajo a las siguientes personas, quienes ayudaron en mi formación y vida universitaria:

A Magdalena...mi más sincera y leal compañera, porque sin ti nada de esto sería realidad, bendito pin de inscripción. De igual forma, a mi madre Lucila Portilla, mi padre Álvaro Niño, mis hermanos Edison y Miguel y mi hermana Zulay... quienes con su apoyo como familia consiguieron y depositaron en mi la confianza y capacidad necesaria para formarme íntegramente como profesional, pero ante todo ser humano. También a Magdalena Blanco por ser mi segunda madre y al resto de mi familia por aportar a mi crecimiento durante estos años.

A mis amigos y compañeros Aldair, Laura, Diana, Sergio “Teyo”, Carolina y a Nicolás con quien compartimos experiencias muy enriquecedoras al realizar este proyecto.

Así mismo, a todas las personas que conocí a lo largo de mis estudios universitarios (estudiantes, profesores, auxiliares, etc.) ... todo aquel quién intervino en mi vida universitaria, pues con sus relaciones me enseñaron cómo actuar en un ámbito social.

A todas las personas de quien recibí buenos consejos y su debido momento: Prof.^a Viviana G., Prof.^a María Antonieta (Toñita), Prof. Sergio B; pues gracias a ellos logré llevar una vida universitaria amena y aprovechar al máximo las oportunidades que se me brindaron.

Diego Alejandro Niño Portilla

Agradecimientos

A la Universidad Industrial de Santander por brindarnos las herramientas y ser el Alma mater que nos permitió formarnos como profesionales íntegros con los conocimientos adquiridos durante estos años de estudio.

A la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales por brindarnos docentes y auxiliares con experiencia, conocimiento y pedagogía necesaria para moldearnos como Ingenieros Metalúrgicos competentes.

Al Semillero de Investigación de Recubrimientos Multifuncionales de la Universidad Industrial de Santander por apoyar desde sus inicios el desarrollo del proyecto.

Al Prof. Sergio Ismael Blanco por ser el director de este trabajo, pues gracias a sus conocimientos, dedicación y voluntad se desarrolló satisfactoriamente cada etapa del proyecto.

A la Desarrolladora de Software Alexandra E. por fundar la plataforma de Búsqueda Gratuita que permitió conseguir con facilidad referencias bibliográficas.

Contenido

	Pág.
Introducción	16
1. Objetivos	18
1.1 Objetivo General	18
1.2 Objetivos Específicos.....	18
2. Metodología	19
3. Discusión y resultados	21
3.1 Generalidades de la corrosión influenciada por microorganismos (MIC).....	21
3.2 Microorganismos	22
3.2.1 Factores que intervienen en el desarrollo de microorganismos	22
3.2.2 Biofilms.....	22
3.2.3 Microorganismos asociados a la MIC.....	25
3.3 Mecanismos de ataque en la biocorrosión	27
3.4 Factores influyentes en la formación de biofilm.....	32
3.5 Métodos de prevención y protección ante la MIC	34
3.6 Tecnologías noveles empleadas para el control de la MIC.....	36
3.6.1 Inhibidores y biocidas	36
3.6.2 Materiales modificados	37
3.6.3 Recubrimientos	37
3.6.4 Superficies superhidrofóbica (SS's)	38

3.7	Estudios noveles de protección ante la MIC.....	39
3.8	Evaluación y análisis de la viabilidad en los métodos de protección estudiados	42
3.8.1	Análisis y comparación de los métodos.....	42
3.8.2	Evaluación de la factibilidad.....	46
4.	Conclusiones.....	49
5.	Recomendaciones	51
	Referencias.....	52
	Apéndices.....	68

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1 Descripción global de artículos seleccionados metódicamente.	32
Tabla 2 Registro de los métodos de prevención y protección más influyentes de los artículos seleccionados para estudios MIC.	40

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1 Cultivo de bacterias SRB en medio Baar's	23
Figura 2 Secuencia de formación y propagación de los biofilms.....	24
Figura 3 Imágenes SEM de células de bacterias P. aureginosa sobre acero SS 304L.....	25
Figura 4 Imágenes SEM de células de bacterias SRB sobre acero al carbono A234 WPB.	27
Figura 5 Esquema simplificado de los principales procesos de daño causados por diferentes microorganismos a tuberías de acero al carbono.	31
Figura 6 Representación esquemática de inhibidores verdes.	36
Figura 7 Cuantificación numérica y porcentual de los métodos de prevención y/o protección y la relación entre estudios con aceros al carbono según las categorías preestablecidas.	43
Figura 8 Cuantificación de diferentes pruebas (caracterización mecanismo de protección, estudios microbiológicos y pruebas electroquímicas) realizadas en las categorías preestablecidas.	44
Figura 9 Cuantificación de la relación entre aceros al carbono y los especificados en aceros grado API 5L estudiados.....	45

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A Registro de los factores más influyentes en los artículos seleccionados para estudios MIC.....	68
Apéndice B Registro de los métodos de prevención y protección más influyentes de los artículos seleccionados para estudios MIC.....	70
Apéndice C Representación gráfica de la cuantificación del material estudiado (acero al carbono, acero inoxidable o aluminio) según las categorías preestablecidas.	84

Glosario

APB	Bacteria productora de ácidos. (Acid-producing bacteria).
API	Instituto americano del petróleo. (American Petroleum Institute).
APS	Amonio peroxodisulfato.
ATP	Adenosin trifosfato.
BD-MIC	Corrosión inducida por microorganismos por biodegradación. Biodegradation – Microbiologically influenced corrosion
BM	Metal base. (Base metal).
BS	Biosurfactante.
CAO	Compuesto activo orgánico.
C-MIC	Corrosión inducida por microorganismos por procesos químicos. Chemical – Microbiologically influenced corrosion.
CUI	Corrosión bajo aislamiento. (Corrosion under insulation).
DET	Transferencia directa de electrones. (Direct electron transfer).
EDX	Espectroscopía de rayos X de energía dispersiva. (Energy dispersive X-ray spectroscopy).
EET-MIC	Corrosión microbiológica por transferencia extracelular de electrones.

	(Extracellular electron transfer).
EIS	Espectroscopía de Impedancia electroquímica. (Electrochemical impedance spectroscopy).
EPS	Sustancias poliméricas extracelulares. (Extracellular polymeric substances).
FESEM	Microscopía electrónica de barrido de emisión de campo. (Field emission scanning electron microscopy).
FSW	Soldadura por fricción-agitación. (Friction stir welding).
FT-IR	Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier. (Fourier Transform Infrared Spectroscopy).
HPLC-Q-TOF-MS	Cromatografía líquida de alta presión acoplada a la espectrometría de masas de tiempo de vuelo cuadrupolar High pressure liquid chromatography coupled with quadrupole time-of-flight mass spectrometry
ICP-OES	Espectroscopía de emisión óptica por plasma de acoplamiento inductivo. (Inductively coupled plasma - Optical emission spectroscopy).
IOB	Bacterias reductoras de hierro. (Iron-reducing bacteria).
ISC	Compuestos inorgánicos de azufre. (Inorganic sulfur compounds).
LPR	Resistencia a la polarización lineal. (Linear polarization resistance).

MET	Transferencia de electrones mediada. (Mediated electron transfer).
MIC	Corrosion inducida por microorganismos. (Microbiologically influenced corrosion).
M-MIC	Corrosion inducida por microorganismos por metabolismo. Metabolite – Microbiologically influenced corrosion.
NACE	Asociación Nacional de Ingenieros en Corrosión (National Association of Corrosion Engineers)
NPs	Nanopartículas.
NRB	Bacterias reductoras de nitrato (Nitrate reducing bacterias)
OCP	Potencial de circuito abierto (Open circuit potential)
QS	Percepción de quórum (Quorum Sensing)
ROS	Especies reactivas de oxígeno (Reactive oxygen species)
SA	Ángulo de deslizamiento. (Slip angle).
SASS	Acero inoxidable super austenítico. (Super austenitic stainless steel).
SOB	Bacterias oxidantes de azufre (Sulfur oxidizing bacterias)

SRB	Bacterias reductoras de sulfato (Sulfate reducing bacterias)
SMR	Macroorganismo reductores de sulfato (Sulfate reducing macroorganisms)
SS	Acero inoxidable (Stainless steel)
SS's	Superficies superhidrofóbicas
TIG	Soldadura por Tungsten inert gas del (<i>GTAW gas tungsten arc welding</i>)
TLC	Cromatografía en capa fina. (Thin layer chromatography)
WCA	Ángulo de contacto con el agua. (Water contact angle).
XPS	Espectroscopía de foto electrones emitidos por rayos X (X-Ray photoelectron spectrometry)
ZAT	Zona Afectada térmicamente

Resumen

Título: Análisis de las técnicas novedales de protección contra la corrosión influenciada por microorganismos (MIC) en tuberías API 5L de acero al carbono: Estado del arte. *

Autores: Nieto Rivera, Nicolás y Niño Portilla, Diego Alejandro. **

Palabras claves: MIC, microorganismos, aceros API 5L, corrosión, biocorrosión, biofilm.

Descripción:

El presente estudio se enfocó en entender la corrosión inducida por microorganismos (MIC), la cual es influenciada por la presencia de microorganismos como: bacterias, arqueas, hongos y algas, por medio de la formación de un biofilm sobre la superficie metálica de las tuberías de acero al carbono grado API 5L y se propicia a través de dos mecanismos principales (MIC por transferencia extracelular de electrones EET-MIC y MIC por metabolismo M-MIC).

Posteriormente, se categorizaron las diferentes técnicas novedales de prevención, control y/o mitigación de la MIC (inhibidores, biocidas, materiales modificados, recubrimientos y superficies superhidrofóbicas SS's), analizando diferentes artículos de impacto entre los años 2018 y 2021.

Por medio de análisis tanto cuantitativo como cualitativos y considerando criterios de eficiencia de inhibición, material estudiado e impacto ambiental; se logró evaluar la viabilidad de las tecnologías estudiadas en la actualidad y llegar a concluir que los estudios futuros abordados en esta área deben estar enfocados en combinar tres (3) tecnologías, las cuales son: las nanopartículas metálicas (NPs) y/o nanocompuestos metálicos, los compuestos activos orgánicos (CAO) y las superficies superhidrofóbicas (SS's).

La anterior combinación puede llegar a ser beneficiosa para el desarrollo a nivel mundial, alcanzando incluso a contribuir con los objetivos propuestos en la agenda de desarrollo sostenible para el 2030 según la ONU.

* Trabajo de grado modalidad investigativa.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director: Sergio Ismael Blanco Vásquez

Abstract

Title: Analysis of novel microbiologically influenced corrosion (MIC) protection techniques for API 5L carbon steel pipelines: State of the art. *

Authors: Nieto Rivera, Nicolás and Niño Portilla, Diego Alejandro. **

Keywords: MIC, microorganisms, API 5L steels, corrosion, biocorrosion, biofilm.

Description:

The present study focused on understanding microbiologically influenced corrosion (MIC), which is caused by microorganisms such as bacteria, archaea, fungi, and algae, through the formation of a biofilm on the metal surface of API 5L grade carbon steel pipes and is caused by two main mechanisms (MIC by extracellular electron transfer EET-MIC and MIC by metabolism M-MIC).

Subsequently, different novel MIC prevention, control and/or mitigation techniques (inhibitors, biocides, modified materials, coatings and superhydrophobic surfaces SS's) were categorized by analyzing different impact articles between 2018 and 2021.

By means of both quantitative and qualitative analyses and considering criteria of inhibition efficiency, material studied and environmental impact, it was possible to evaluate the viability of the technologies currently studied and conclude that future studies in this area should focus on combining three (3) technologies: metallic nanoparticles (NPs) and/or metallic nanocomposites, active organic compounds (OACs) and superhydrophobic surfaces (SS's).

The above combination can be beneficial for global development, even contributing to the objectives proposed in the UN's 2030 sustainable development agenda.

* Degree research Project.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director: Sergio Ismael Blanco Vásquez.

Introducción

La industria petroquímica se divide en 4 grandes procesos: exploración sísmica, perforación y producción, transporte y refinación. La exploración sísmica es el primer proceso que se debe realizar debido a que su objetivo principal es obtener una imagen detallada del yacimiento antes de la perforación. La perforación y la producción se consideran como una sola operación, la razón es que estas tienen como objetivo la extracción de crudo de petróleo y gas natural. Teniendo en cuenta que las plantas de refinación de donde se obtienen diferentes derivados no se encuentran directamente ubicadas en las zonas de extracción, es necesario el transporte del crudo, ya sea por líneas de transporte o buques marítimos (Khan & Islam, 2007).

Las tuberías API 5L (American Petroleum Institute) utilizadas para el transporte de crudo poseen excelentes propiedades mecánicas pero su estabilidad electroquímica puede verse afectada por diferentes factores, generando corrosión, tanto interna como externa. Entre los mecanismos asociados a la corrosión de tuberías se encuentran la corrosión galvánica, corrosión atmosférica, corrosión bajo aislamiento (CUI), corrosión-erosión y corrosión inducida por microorganismos MIC (Meisner & Leffler, 2006). Existen diferentes tipos de microorganismos (bacterias, algas, hongos) que afectan las tuberías y su crecimiento depende directamente de las condiciones ambientales, esto genera diferentes daños como la formación de picaduras y taponamiento de las tuberías (API, 2011).

Aunque la MIC y las técnicas convencionales de protección de tuberías contra este proceso de degradación se encuentran altamente documentadas (Borenstein, 1994, pp. 221–241; Javaherdashti, 2008, pp. 9–16; Skovhus, 2017), el desarrollo de nuevas formas de prevención y protección de tuberías contra la MIC sigue siendo de interés en el mundo científico y tecnológico.

Por lo tanto, este estudio en forma de monografía permitió realizar un análisis teórico de técnicas de protección noveles que existen contra la corrosión MIC que puede presentarse internamente así como externamente en las tuberías de acero al carbono estandarizadas por la norma API 5L (API, 2018).

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Analizar las técnicas noveles de protección contra la corrosión influenciada por microorganismos en tuberías API 5L de acero al carbono.

1.2 Objetivos Específicos

Identificar los factores ambientales y agentes microbiológicos que promueven la corrosión influenciada por microorganismos (MIC) sobre tuberías API 5L de aceros al carbono.

Categorizar las técnicas noveles de protección en tuberías API 5L de aceros al carbono para minimizar la corrosión influenciada por microorganismos (MIC).

Evaluar la factibilidad y aplicabilidad de las técnicas noveles de protección con el propósito de mitigar los procesos corrosivos influenciados por microorganismos en tuberías API 5L de aceros al carbono.

2. Metodología

A continuación, se describe la metodología empleada durante el desarrollo del proyecto en aras de proporcionar una guía del paso a paso ejecutado:

a. Revisión bibliográfica: El primer paso para realizar el presente proyecto fue la búsqueda, recopilación y organización de artículos científicos publicados en revistas arbitradas. Los motores de búsqueda empleados fueron principalmente Google Académico y la página de la biblioteca virtual ofertada por la UIS, esta permitió buscar en diferentes plataformas (e.g. Science Direct, Springer, Knovel, etc.). La información obtenida fue considerada relevante siempre y cuando las referencias bibliográficas tuvieran soporte de editoriales científicas o ingenieriles (e.g. Reed-Elsevier, Springer, Wiley-Blackwell, John Wiley & Sons, Taylor & Francis, etc.). Para obtener la información adecuada, fue necesario el uso de palabras claves que relacionaran la problemática tratada en el proyecto, tales como: MIC, biocorrosión, corrosión microbológica, microorganismos, MIC en tuberías, aceros API 5L, biofilm, protección MIC, mitigación MIC, entre otras. Además, como criterio de selección y aceptación de la información se aplicaron algunos filtros (año de publicación y tipo de referencia bibliográfica). Para las técnicas noveles de protección fueron considerados artículos investigativos publicados entre los años 2018-2021, para la bibliografía en general se incluyeron textos publicados a partir del año 2000, exceptuando dos libros con conceptos básicos (*Borenstein, 1994; Othmer, 1994*); tomando en consideración libros, artículos reviews e investigativos, normas y códigos.

b. Clasificación de las referencias bibliográficas: las referencias fueron debidamente clasificadas empleando el software *Mendeley Desktop*, considerando su relevancia (contenido y

calidad para cada tema tratado) de tal forma que se lograra obtener la información necesaria para alcanzar cada uno de los objetivos propuestos en el proyecto.

c. Revisión y comparación de los resultados presentados: inicialmente, para el primer objetivo se analizaron una serie de artículos que permitieron desglosar la información, de tal forma que pudieran determinarse los factores y microorganismos más influyentes en procesos biocorrosivos (considerando la repetitividad y agresividad de los microorganismos en los diferentes estudios); además, por medio de textos bibliográficos se logró comprender los mecanismos de ataque que proceden de la MIC en metales. Para el segundo objetivo se utilizó una metodología similar a la primera, diferenciándose que los artículos estudiados estaban enfocados mayoritariamente en analizar la eficiencia global de los métodos noveles empleados para proteger y/o mitigar la MIC, alcanzando así entender y clasificar las nuevas tecnologías en vía de desarrollo según la complejidad del método elaborado y la eficacia de mitigación.

d. Análisis de factibilidad: por medio de análisis cualitativos, matrices FODA (teniendo en cuenta criterios ingenieriles) y análisis cuantitativos (tendencias usando tablas y gráficos) de aquellos artículos enfocados en los métodos noveles de protección, se logró evaluar la factibilidad y reproducibilidad considerando ciertos parámetros (eficiencia de inhibición, material estudiado e impacto ambiental) de cada uno de los estudios analizados. A través de la evaluación previa, se consiguió describir 3 tecnologías (las más influyentes) con visión de ser potenciales para combatir la MIC, brindando así recomendaciones hacia dónde enfocar posteriores investigaciones dirigidas a estudios en el área de la protección ante la MIC en tuberías en la industria Oil & Gas.

3. Discusión y resultados

3.1 Generalidades de la corrosión influenciada por microorganismos (MIC)

Antes de entrar en materia, recordemos que los materiales a corroerse pueden ser de 3 tipos según su matriz: metálicos donde su corrosión es causada por procesos electroquímicos; cerámicos cuyo deterioro se da a temperaturas muy elevadas y/o en ambientes muy exigentes; o poliméricos cuyo mecanismo de corrosión es la degradación causada generalmente por la radiación, reacciones químicas o calor afectando las cadenas poliméricas por defecto (Cicek, 2014, pp. 1–4). Por lo anterior es pertinente mencionar que la MIC es un mecanismo que está altamente relacionado con procesos electroquímicos, por tal motivo tiene mayor investigación en metales, sin dejar atrás que puede afectar a materiales no metálicos (Brenda J. Little & Lee, 2007, pp. xi–xii).

La corrosión influenciada microbiológicamente descrita por sus siglas en inglés MIC, puede ser conocida bajo otros nombres como: corrosión inducida microbiológicamente, biocorrosión, corrosión microbiana, corrosión biológica (Hashemi et al., 2018); sin embargo, todas conducen a la misma definición, la cual según NACE (NACE International, 2018) “es la corrosión afectada por la presencia o actividad (o ambas) de microorganismos en biopelículas sobre la superficie de un material a corroer”.

Las biopelículas de microorganismos conocidos mayormente como *biofilms* son un conjunto organizado de diferentes agentes microbianos que causan una reacción en su entorno (Raghupathi et al., 2018), este tema se desglosará posteriormente a lo largo del escrito, para así dar a entender con mayor facilidad y claridad al lector lo relacionado con microorganismos y como se involucran estos con el desarrollo de la MIC.

3.2 Microorganismos

3.2.1 Factores que intervienen en el desarrollo de microorganismos

Como aspecto fundamental para entender el desarrollo de los microorganismos existen diferentes condiciones bióticas y abióticas que representan un efecto considerable para el desarrollo, establecimiento y posterior afectación a los materiales en sí (Gaylarde et al., 2003; Stanaszek-Tomal, 2020). Entre los principales factores tanto físicos, químicos como físico-químicos que se han determinado para el desarrollo de los microorganismos (propiamente hablando de hongos, algas, bacterias, arqueas, entre otros) se ha llegado a observar y establecer el efecto que tiene: la humedad (actividad acuosa o humedad relativa), grado de turbulencia del fluido, temperatura, presión (hidrostática y osmótica), disponibilidad lumínica, aireación o ventilación, pH del medio, disponibilidad de aceptadores de electrones, disponibilidad de nutrientes en el medio (iones disueltos), presencia de sales, potencial electroquímico (Redox). Además, se ve influenciada por las propiedades de los materiales en donde se presenta el consorcio microbiano (carga superficial, tensión superficial, mojabilidad, porosidad, rugosidad y la composición química) (Bertron, 2014; Borenstein, 1994; Brasca et al., 2007; Curling et al., 2002; Gadd & Dyer, 2017; Gaylarde et al., 2003; Gehlot & Singh, 2018, pp. 449–465; Javaherdashti, 2008, pp. 73–87; Brenda J. Little & Lee, 2007, pp. 1–19; NACE International, 2018, 2016; Pereira et al., 2000; Stanaszek-Tomal, 2020; Tran et al., 2012; Usher et al., 2014).

3.2.2 Biofilms

Para términos prácticos, autores (Flemming et al., 2016; Jia et al., 2019) han definido los biofilms como un conjunto organizado de diferentes microorganismos, que tienen la capacidad de adaptarse y generar un entorno sinérgico, donde ellos producen sustancias poliméricas extracelulares (**EPS**) que pueden provocar la adhesión a una superficie. Como sugiere (O'Toole et

al., 2000) los microorganismos como las bacterias han sido débilmente percibidos o subestimados cuando se encuentran en comunidades de una misma especie; sin embargo, los agregados de múltiples especies pueden generar efectos de mayor impacto en el entorno que habitan. La mayoría de biofilms se desarrollan teniendo en cuenta células con diferentes características, con esto se hace referencia que en los medios generalmente se encuentran microorganismos con características sésiles y plantónicas (Garrett et al., 2008); en otras palabras, están los organismos adheridos a las paredes del entorno y aquellos que flotan libremente sobre un medio. Particularmente hablando del caso de MIC en tuberías de hidrocarburos, el agua es el medio que facilita su transporte, alimentación y respiración (Khouzani et al., 2019).

Figura 1

Cultivo de bacterias SRB en medio Baar's.



Nota. Adaptado de (Al-Sultani et al., 2021)

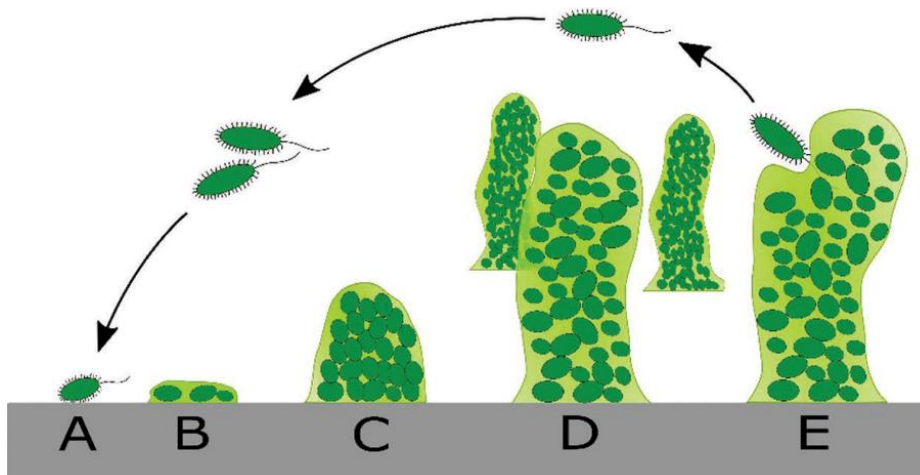
Para permitir y generar el desarrollo de un biofilm los microorganismos asociados a este deben cumplir una serie de etapas que les permiten alcanzar el establecimiento y la propagación propia de este. (Beech et al., 2015; Brown & Turner, 2019; Garrett et al., 2008) Un biofilm inicia su formación en el momento que en la superficie del material se presenta una adhesión de carácter irreversible, provocado por un conjunto de células que encuentran las condiciones apropiadas. Este

proceso está mejor entendido como una capa de acondicionamiento la cual permite el desarrollo en la producción de componentes esenciales (Exo-polisacáridos, ADN extracelular, proteínas, lípidos, etc.) estableciendo un conglomerado que da pie a la siguiente etapa, el crecimiento y maduración de la población de células (generalmente diversificadas) que se agregan a la comunidad.

Es conocido que el desarrollo de un biofilm es continuamente dinámico y complejo, así como los tipos de microorganismos que intervienen, que al organizarse son capaces de generar estructuras que permiten la estratificación de nutrientes por medio de membranas permitiendo el intercambio de ellos y la respiración según el requerimiento de cada organismo.

Figura 2

Secuencia de formación y propagación de los biofilms.



Nota. A) Adhesión inicial de células platónicas en la superficie. B) Adhesión irreversible del conglomerado celular e inicio de producción de componentes esenciales para el biofilm. C) Crecimiento y maduración del biofilm. D) Estratificación de nutrientes. E) Desprendimiento de grupo de células para migración y dispersión del biofilm (Reinicio del ciclo). Adaptado de (Brown & Turner, 2019)

La siguiente etapa, consiste en el desprendimiento de grupos de células que migran para encontrar unas mejores condiciones de su microambiente, conllevándolas a buscar una respiración

y/o alimentación adecuada, finalmente, al llegar a este punto se reinicia el ciclo de formación del biofilm, produciendo su propagación a lo largo del sistema como se puede observar en la Figura 2.

3.2.3 *Microorganismos asociados a la MIC*

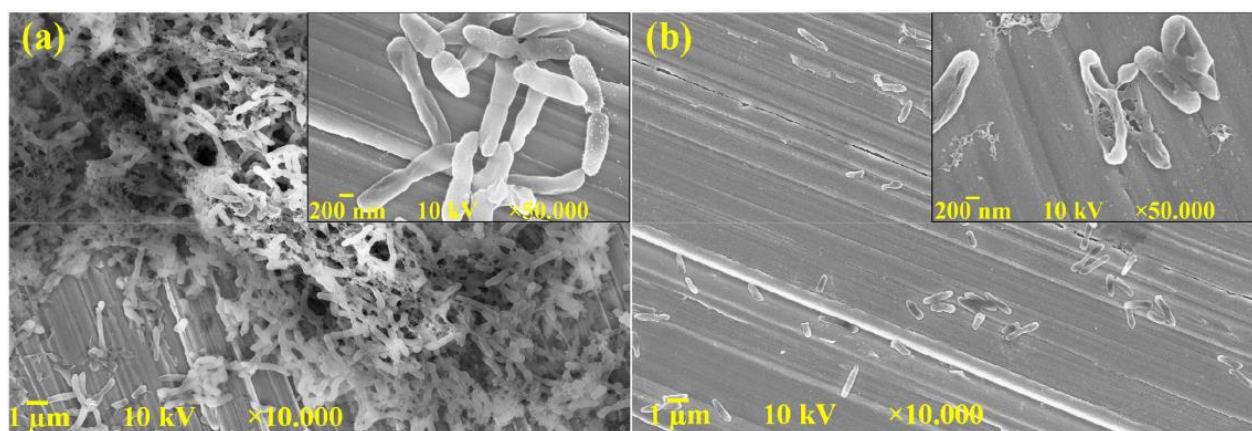
Considerando que un biofilm está compuesto de múltiples especies (generalmente no todas promueven o incitan la MIC) es necesario mencionar los microorganismos más involucrados con este proceso corrosivo (de menor a mayor relevancia):

- **Hongos:** Son microorganismos eucariotas que se extienden o crecen de forma organizada mediante micelios, estos generan MIC debido a la producción de ácidos orgánicos y la desoxigenación dando paso al establecimiento de bacterias de tipo sulfato reductoras, un ejemplo de este microorganismos es *Aspergillus Niger* (Burt, 2015; B. B. Little & Ray, 2001).

- **Algas:** De manera similar a los hongos, las microalgas conocidas como Diatomeas tienen la capacidad de generar ácidos orgánicos que pueden favorecer el desarrollo de otro tipo de microorganismos con mayor efecto para la MIC.

Figura 3

Imágenes SEM de células de bacterias P. aureginosa sobre acero SS 304L.



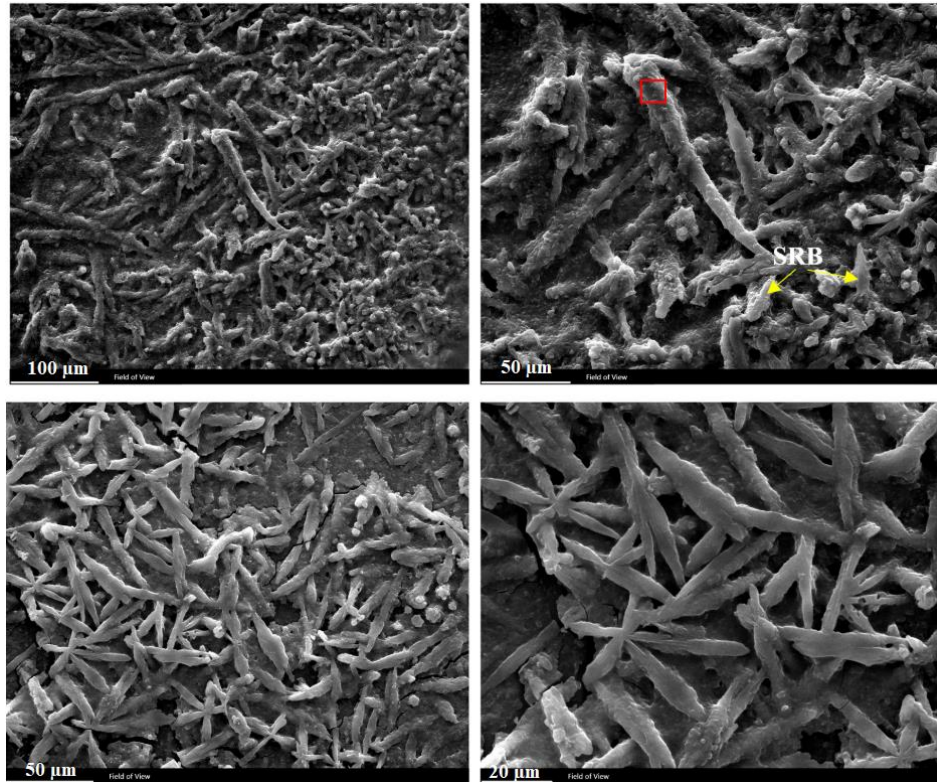
Nota. (a) Medio biótico sin inhibición. (b) Medio biótico inhibido. Adaptado de (Lekbach, Li, et al., 2019)

- **Arqueas:** Son una especie de microorganismos que comparten similitudes a las bacterias; sin embargo, poseen genes de tipo eucariota. De este tipo de microorganismo las que principalmente se ha estudiado que tengan influencia con la MIC son las de tipo metanógenas como la *Methanomethylovorans* y las arqueas de tipo aeróbicas halófilas como la *Natronorubrum tibetense* (Othmer, 1994; Qian et al., 2018; Zhou et al., 2020).
- **Bacterias:** Estos microorganismos son de tipo procariota, donde conjuntamente se encuentran ligados con mecanismos de daño y procesos corrosivos relacionados a la MIC, tales como: corrosión general, corrosión CUI, corrosión por H₂S, corrosión por enfriamiento del agua, corrosión galvánica, stress corrosión cracking y hasta corrosión por CO₂ (API, 2011; NACE International, 2016, 2018) ya sea hablando de medios aeróbicos o anaeróbicos. Existen una gran cantidad de bacterias que han sido estudiadas con respecto a su influencia en la MIC; no obstante, solo algunos tipos de ellas representan un gran riesgo debido a su alto impacto en el aumento de la corrosividad de los materiales. Entre algunos ejemplos, se puede encontrar las bacterias sulfato reductoras o mejor conocidas como **SRB** por sus siglas en inglés (*Desulfovibrio desulfuricans*, *Desulfovibrio vulgaris*, *Acetomicrobium*, *Citrobacter sp.*, entre otras) donde estas son las más estudiadas debido al efecto adverso que tienen sus productos metabólicos, logrando desencadenar corrosión localizada con alta tasa de penetración (Dall’Agnol & Moura, 2015), por otra parte, se encuentran las reductoras de nitratos o **NRB** por sus siglas en inglés (*Brevibacterium frigiditolerans*, entre otras). Además, también se presentan las bacterias Aureginosas o más específica la *Pseudomona aureginosa*, esta bacteria gramnegativa está muy dispersa en el medio ambiente, son aeróbicas con motilidad unipolar y desempeña un papel importante en el inicio de propagación de la MIC (Lekbach, Li, et al., 2019; Shi et al., 2018). De igual forma no se deben descartar las repercusiones que pueden generar otros tipos de bacterias como: metanógenas

(*Metanobacterium IM-1*, entre otras), oxidantes de azufre **SOB**, reductoras de hierro **IOB** y las productoras de ácidos **APB** (*Acidithiobacillus*, entre otras) (An et al., 2020; Telegdi et al., 2017; Yang et al., 2020).

Figura 4

Imágenes SEM de células de bacterias SRB sobre acero al carbono A234 WPB.



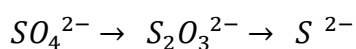
Nota. Todas las imágenes son de características similares con diferentes aumentos. Adaptado de (Khouzani et al., 2019)

3.3 Mecanismos de ataque en la biocorrosión

Particularmente en la MIC se presentan diversos mecanismos asociados, cada uno de estos describe un proceso corrosivo característico que depende del microorganismo involucrado, pero a su vez se pueden generar varios mecanismos de ataque bien sean simultáneos (ejerciendo un efecto sinérgico) o independientes para el proceso corrosivo de la MIC. Tres mecanismos han sido estudiados hasta el momento (MIC por transferencia extracelular de electrones **EET-MIC**, MIC

por metabolismo **M-MIC** y MIC por biodegradación **BD-MIC**) (Brown & Turner, 2019; Gu, 2012; Jia et al., 2019; Rasheed, Jabbar, Mackey, et al., 2019; D. Wang, Liu, et al., 2020); ahora, de estos los que implican mayor impacto para los procesos corrosivos influenciados biológicamente son la EET-MIC y la M-MIC, por esto se hace indispensable describir y comprender su funcionamiento.

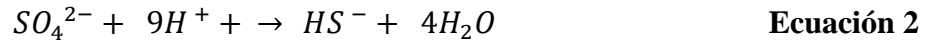
La transferencia extracelular de electrones o EET se refiere al mecanismo que utilizan algunos microorganismos (principalmente bacterias) para la producción de energía de forma más eficiente, por medio de la reducción intracelular de algunos compuestos orgánicos los cuales liberan electrones insolubles fuera del citoplasma de la bacteria. Para poder transportar los electrones exógenos a través de la pared celular y lograr llegar al citoplasma donde se realiza la reducción de los compuestos orgánicos, se pueden utilizar uno de dos métodos de transferencia los cuales son: la transferencia directa de electrones **DET** o la transferencia de electrones mediada **MET**. La primera utiliza proteínas redox unidas a la membrana celular, las cuales entran en contacto directo con la superficie metálica y funcionan como conductores para la transferencia de electrones, ahora, la segunda se basa en portadores de electrones como la riboflavina que transporta dichas partículas hasta el citoplasma de la bacteria (Dou et al., 2019; Gu, 2012; D. Xu et al., 2016). Un claro ejemplo de EET-MIC aplica para las SRB, las cuales reducen compuestos de azufre como el sulfato, sulfito y tiosulfato (aceptadores de electrones) en ion sulfuro mediante el proceso de respiración, para ello las enzimas **ATP** sulfurilasa, enzimas **APS** y el sulfito reductasa desempeñan un papel clave en la activación de la molécula inerte de sulfato después de que los electrones se han transportado desde la superficie ya sea por DET o MET (dada por la Ecuación 1).



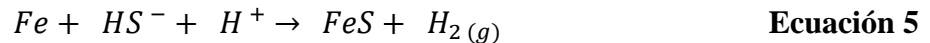
Ecuación 1

(Sulfato) → (Sulfito) → (Sulfuro)

La influencia de este proceso de obtención de energía en la MIC se debe principalmente al ion bisulfuro HS^- , el cual es producido por las SRB teniendo en cuenta la siguiente reacción electroquímica:



Donde luego se generan simultáneamente las siguientes reacciones electroquímicas:



Cabe aclarar que esta serie de reacciones, aunque se relacionen con la producción del ácido sulfhídrico H_2S , este no representa mayor relevancia en la MIC cuando se encuentra en un medio de pH neutro o casi neutro; sin embargo, es un indicador de la presencia masiva de células de SRB en el biofilm. Con respecto a la EET-MIC de las SRB, los mayores influenciadores de este mecanismo de ataque, proceden del ion bisulfuro que queda libre en el medio y va consumiendo el material del acero al carbono al reaccionar con el hierro (Ecuación 5), y que estas bacterias también producen su energía proveniente de otros compuestos (donantes de electrones) como el hidrógeno, compuestos orgánicos y la oxidación extracelular del hierro (Ecuación 6), lo cual van formando picaduras en la superficie del metal (Dall’Agnol & Moura, 2015; Loto, 2017; Pakiet et al., 2019; D. Wang, Liu, et al., 2020).



Ahora bien, el siguiente mecanismo es igualmente relevante hablando propiamente de la MIC. (Brown & Turner, 2019) nombra como **C-MIC** a los por procesos químicos de la MIC, pero el mecanismo regularmente se conoce como M-MIC y también relacionado como MIC de tipo II (Gu, 2012; D. Xu et al., 2016). Este mecanismo de la biocorrosión está descrito como aquel causado por la interacción de los metabolitos corrosivos (e.g. ácido oxálico, otros ácidos grasos orgánicos) que son producidos por ciertos microorganismos fermentativos (e.g. APB y hongos como *Aspergillus niger*) ante la ausencia de aceptadores de electrones que le permiten llevar a cabo el balance de la reacción redox, causando una caída del pH en la parte inferior del biofilm, posteriormente provoca la interacción directa y el ataque por ácidos debido a los protones disponibles sobre zonas catódicas (removiendo parte del material presente). Lo anterior hace que se asemejen a los ataques por corrosión química convencional (e.g. producidos por ácido acético), por este motivo los autores generalmente se refieren como M-MIC y no como C-MIC, pues la corrosión química se asocia a otro mecanismo de corrosión lo que podría generar una confusión al momento de entender este proceso. Algo particular de la M-MIC es que a diferencia de la ETT-MIC, esta no necesita un biocatalizador como si sucede con la biocorrosión por las *Desulfotomaculum desulfuricans* (Brown & Turner, 2019; Eduok et al., 2019; Gu, 2012; Y. Li et al., 2018; B. Liu et al., 2020; D. Xu et al., 2016). (Dong et al., 2018) logra explicar como la Bacteria *Acidithiobacillus caldus SM-1* por medio de diferentes secuencias de genomas (e.g. *Sqr* y *Tth*) son capaces de descomponer compuestos inorgánicos de azufre **ISC** (Ecuación 7), hasta producir ácido sulfúrico (Ecuación 2); posteriormente los protones liberados en la (Ecuación 7), disminuyeron el pH incluso hasta valores inferiores a 2.

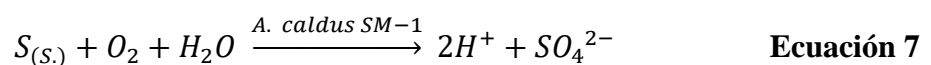
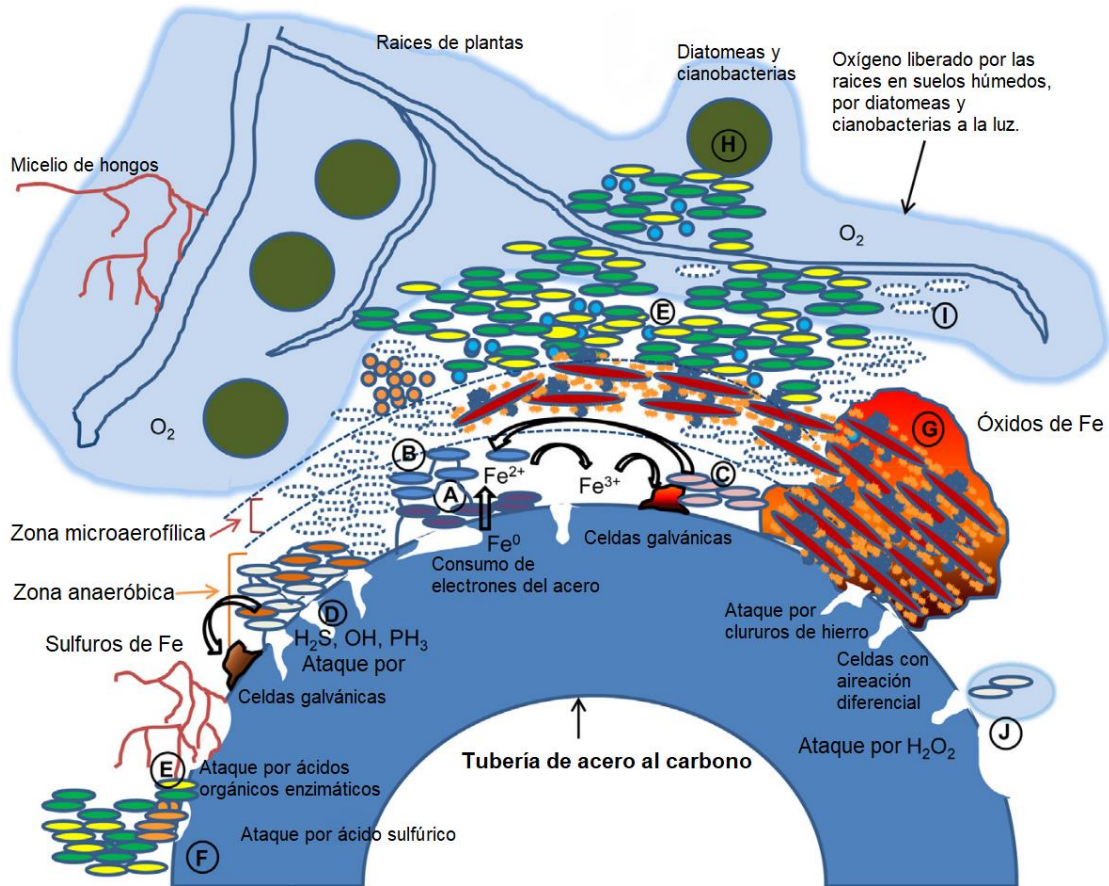


Figura 5

Esquema simplificado de los principales procesos de daño causados por diferentes microorganismos a tuberías de acero al carbono.



Nota. A) Metanógenas y macroorganismos reductores de sulfato (SRM) anaeróbicos. B) Microorganismos oxidantes de hierro anaeróbicos. C) Microorganismos reductores de hierro anaeróbicos. D) SRM anaeróbicos. E) Microorganismos heterótrofos. F) Microorganismos oxidantes de azufre. G) Bacterias oxidantes de hierro neutrófilos. H) Diatomeas y cianobacterias. I) otros macroorganismos. J) Macroorganismos aeróbicos asociados al suelo. Adaptado de (Usher et al., 2014).

Causando una destrucción de la capa pasivada y extendiendo el ataque causado por los microorganismos hasta la matriz del metal. En el caso de (Gu et al., 2019) muestra ligeramente cómo las SRB pueden cambiar de mecanismo de ataque entre la EET-MIC y la M-MIC dependiendo del metal base (Fe o Cu) en que se esté provocando la MIC.

3.4 Factores influyentes en la formación de biofilm

La Tabla 1 presenta una descripción global del análisis realizado a cinco (5) artículos metódicamente seleccionados considerados como representativos en relación a los estudios más recientes con respecto a la corrosión MIC en aceros, dejando así para el Apéndice A el registro de los factores más influyentes en cada uno de estos estudios, aclarando que fueron pruebas realizadas en laboratorios, y bajo ciertas condiciones (agregado de nutrientes y otros compuestos en concentraciones más específicas) con el fin de reducir el tiempo de incubación y el desarrollo de los microorganismos, para así poder realizar pruebas de corrosión aceleradas (Yin et al., 2018).

Tabla 1.

Descripción global de artículos seleccionados metódicamente.

#	Referencia	Descripción
1	(B. Liu et al., 2020)	En un acero para tubería grado X80 el estudio de la MIC a causa de un microorganismo de tipo NRB en el suelo <i>Brevibacterium frigoritolerans</i> estudiado en un suelo artificial de Beijing, utilizando mediciones electroquímicas y análisis de superficie en condiciones aeróbicas, en donde se observó después de eliminar los productos y la morfología de la corrosión reveló picaduras agravadas en la muestra que se sumergió en un medio inoculado. La profundidad de la picadura después de 14 días debido al efecto de la <i>B. frigoritolerans</i> fue de aproximadamente 7,16 μm . Se determinó que el principal factor de corrosión de la MIC no es el cambio en el valor del pH. Las pruebas electroquímicas mostraron que este microorganismo podría cambiar la estabilidad de los productos de corrosión al séptimo día. La biopelícula no homogénea y la conductividad del Fe_2O_3 aceleraron el proceso de corrosión. La presencia del ion amonio (NH_4^+) en la superficie del acero reveló que las bacterias actuaron como un cátodo biológico para promover la reacción catódica. El contenido de oxígeno diferente en la interfaz de metal es fácil de formar una celda de concentración de oxígeno, que es un factor importante que causa la corrosión local.
2	(Shi et al., 2018)	Se ha demostrado que el cobre actúa de diferentes maneras fortaleciendo la precipitación por envejecimiento y la bio-función como bactericida, para este estudio se fabricó un acero novedoso para tuberías que contiene Cu ajustando los contenidos de carbono (C) y manganeso (Mn) y haciendo un diseño de aleación de Cu adecuado basado en un acero grado X80, según su composición química, se fabricaron dos aceros con variación en el contenido de cobre (1% Cu y 2% Cu). Con el aumento del contenido de Cu, la resistencia aumenta, pero el alargamiento y la resistencia al impacto disminuyen drásticamente, pero mejoran con el tratamiento del envejecimiento, lo que demuestra evidentemente que el refuerzo por precipitación de Cu tuvo lugar en el acero. Se estudió la microestructura, propiedades mecánicas y propiedad antibacteriana frente a bacterias reductoras de sulfato (SRB) y (<i>P. aeruginosa</i>). Se descubrió que el nuevo acero para tuberías aleado con 1% de Cu exhibía una microestructura de ferrita acicular con una distribución de precipitados ricos en Cu de tamaño nanométrico en la matriz, lo que resultaba en mejores propiedades mecánicas que el acero X80 tradicional y también mostraba una buena resistencia a la MIC. La resistencia a la corrosión por picaduras del acero al 1% de Cu en condiciones envejecidas fue significativamente mejor que la del

#	Referencia	Descripción
		acero X80 y logrando proponer un posible mecanismo antibacteriano del acero de X80 modificado.
3	(Lekbach, Li, et al., 2019)	El estudio del comportamiento de las <i>P. aeruginosa</i> mediante un extracto de <i>Salvia officinalis</i> (planta aromática y medicinal) que tienen muchas vías metabólicas secundarias que secretan compuestos activos, entre ellos los compuestos orgánicos heterocíclicos llamados fenoles, con grupos funcionales polares poseen la capacidad de adsorberse sobre superficies metálicas y formar una capa protectora que las protege de la corrosión, siendo una fuente adecuada de inhibidores potenciales para mitigación de la MIC. La mitigación de la biocorrosión del acero inoxidable 304L (SS) en donde las bacterias pueden formar biopelículas y los productos de sus metabolismos afectaran la película pasiva. El extracto se caracterizó por HPLC-Q-TOF-MS y se evaluó su propiedad "antibiofilm". Los datos revelaron la presencia de compuestos antimicrobianos y anticorrosivos bien conocidos en el extracto. Se encontró que el extracto de <i>S. officinalis</i> es eficaz para prevenir la formación de biopelículas e inhibir las biopelículas maduras (durante los 14 días de exposición), lo que indica que el extracto de la planta inhibió la formación de biofilm. Los resultados electroquímicos indicaron que las <i>P. aeruginosas</i> aceleró la MIC del 304L SS, mientras que se encontró que el extracto previene dicha corrosión con una eficiencia de inhibición de $97,5 \pm 1,5\%$. Estos hallazgos sugirieron que los compuestos activos en el extracto de la planta tenían una acción dual: (i) prevenir la formación de biopelículas, (ii) desintegrar la arquitectura de la biopelícula y matar las bacterias sésiles. Esto se atribuyó a la formación de una película protectora por la adsorción de algunos compuestos del extracto en la superficie de 304L SS.
4	(Yang et al., 2020)	La susceptibilidad a la MIC del acero inoxidable súper austenítico S32654 soldado por fricción y agitación (FSW) a la zona afectada por el calor (ZAT) es atacada preferentemente debido a la ferritización excesiva y la precipitación de nitruro de cromo durante el proceso de soldadura, en donde por fusión convencionales, incluida la TIG GTAW, conducen inevitablemente a defectos como sensibilización, precipitación en caliente, vaporización del elemento, crecimiento de granos y porosidades. Los ciclos térmicos durante el proceso de soldadura fácilmente provocan la precipitación de fases ricas en Cr y Mo, lo que creará regiones empobrecidas en Cr y por lo tanto disminuirá la resistencia a la corrosión del SASS. Esto en presencia de APB <i>Acidithiobacillus caldus SM-1</i> se investigó mediante técnicas de análisis de superficie y mediciones electroquímicas. La profundidad promedio de las picaduras en la superficie del cupón FSW fue de $2.8 \pm 0.5 \mu\text{m}$ después de 14 días de inmersión en el medio con <i>A. caldus SM-1</i> , que fue similar a la del cupón de metal base de control (BM) ($2.7 \pm 0.6 \mu\text{m}$). Los resultados de las mediciones electroquímicas mostraron que los cupones de control de BM y FSW tenían tasas de corrosión muy cercanas tanto en medios abióticos como bióticos. Los resultados indicaron que el proceso FSW no disminuyó la resistencia a la corrosión del SASS. Además, <i>A. caldus SM-1</i> aceleró significativamente la corrosión general y la corrosión por picaduras de los cupones de control. El valor de pH más bajo del medio inoculado llegó a $1,81 \pm 0,09$ después de 14 días de incubación. La aceleración de la velocidad de corrosión puede atribuirse a la generación y enriquecimiento de metabolitos ácidos agresivos bajo el biofilm. La corrosión acelerada en presencia de este microorganismo se relacionó con el bajo pH causado por los metabolitos ácidos debajo del biofilm.
5	(Shahryari et al., 2019)	En este estudio analizó el efecto de las <i>Citrobacter sp.</i> para el acero API 5L X70 se evaluando en una solución de suelo simulada en diferentes tiempos de inmersión (de 7 días a 40 días) en condiciones abióticas y bióticas utilizando potencial de circuito abierto (OCP) y Espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS). Los productos de corrosión y la morfología del biofilm en la superficie del metal se evaluaron mediante microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (FESEM). La formación de una capa protectora de productos de corrosión que incluyen óxido férrico, sulfuro y compuestos a base de carbono acumulados en el acero subyacente conduce a un aumento de la resistencia a la corrosión durante los primeros 21 días en condiciones abióticas,

#	Referencia	Descripción
		Dado que el Rct describe la reacción anódica (de disolución) para los procesos electroquímicos; un aumento de Rct con el tiempo indica una disminución de la transferencia de carga. Los resultados de la EIS en la solución que contiene bacterias muestran una reducción significativa en la resistencia a la transferencia de carga de 400 Ω cm ² después del día 7 a -55 Ω cm ² después del día 21 debido a la formación de biofilms. Esta reducción en la resistencia a la corrosión es consistente con las altas concentraciones de sulfuro producidas por el metabolismo de las bacterias y la formación del biofilm (relativamente compacto y espeso) que se dispersa heterogéneamente sobre la superficie. Además, se observa una mayor susceptibilidad a la corrosión por picaduras para las muestras sumergidas en el medio biótico, la formación de una película conductora de sulfuro de hierro en la superficie forma un acoplamiento galvánico entre el sulfuro de hierro y la superficie subyacente, mejorando la cinética de corrosión. También vale la pena señalar que la formación de microceldas de corrosión con un cátodo grande y un ánodo pequeño entre la biopelícula y el metal libre, crea un ambiente agresivo y acelera la reacción de disolución anódica lo que indica una mayor tendencia a la corrosión por picaduras en la presencia de la cepa <i>Citrobacter sp.</i>

3.5 Métodos de prevención y protección ante la MIC

Ahora que el panorama está un poco más claro, se hace indispensable entender que este mecanismo de corrosión debe ser mitigado, considerando que los daños ocasionados en la industria Oil and Gas están por encima del veinte por ciento (>20%) en relación a la falla en los activos de este sector (Cheng et al., 2021; Eduok et al., 2018; Guo et al., 2018; Lekbach et al., 2018; Parthipan et al., 2018, 2021; Rasheed, Jabbar, Rasool, et al., 2019; Shi et al., 2018; J. Xu et al., 2018; Zhai et al., 2018) llegando así al propósito de la reducción de pérdidas económicas mediante la implementación de técnicas novedosas para lidiar con este problema.

A lo largo de estos años desde que se comprendió el daño potencial que pueden causar los microorganismos, autores como: (Chugh et al., 2020; B. J. Little et al., 2020; Videla & Herrera, 2005) han recopilado información acerca de los métodos de mitigación, control y prevención que se han venido implementando desde los inicios de este problema. Métodos convencionales como la protección catódica, sin duda son eficientes para controlar ciertos tipos de corrosión; no obstante, son inviables ante la influencia de microorganismos tal como lo indican (Liduíno et al., 2021; T. Liu & Cheng, 2017) en sus estudios. Métodos físicos de limpieza como: el pigging (uno

de los primeros y actualmente uno de los más usados), la limpieza por ultrasonido y la inhibición por ultravioleta representan métodos bastante convencionales para mitigar esta situación; sin embargo, sus costos son elevados, además de tener limitaciones en ordenamientos complejos de tubería. Así pues, se desarrollaron alternativas que facilitarían el acceso a sitios de difícil alcance, fue entonces cuando se crearon los inhibidores y biocidas (tratamientos químicos) que sentaron las bases para de lo que hoy se conocen como “las nuevas tecnologías” para el control de la MIC (Jia et al., 2019; Kokilaramani et al., 2020; Pakiet et al., 2019).

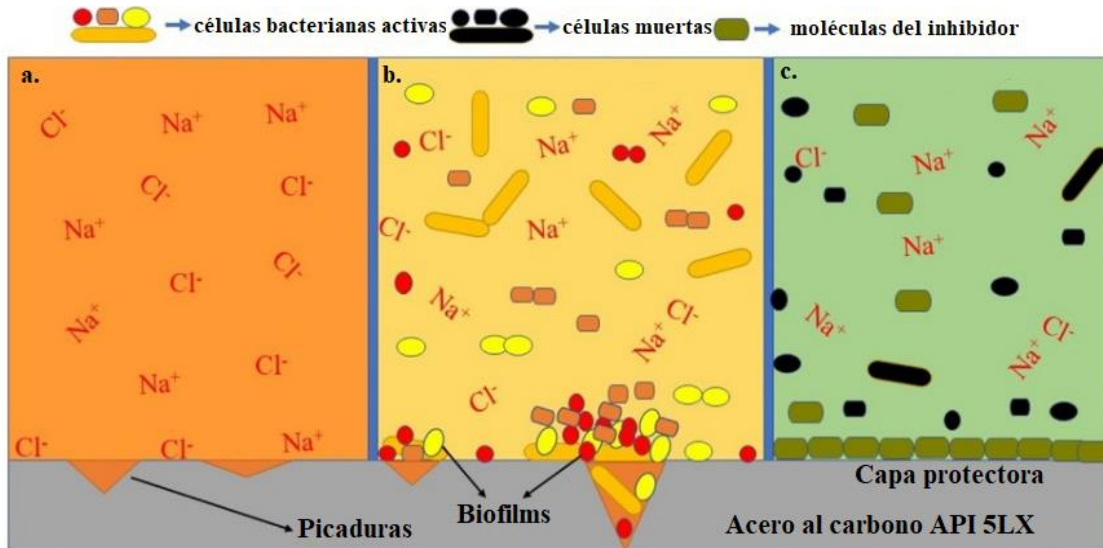
Abordando el tema de nuevas tecnologías, diferentes estudios han venido desarrollándose para buscar las mejores y más eficientes alternativas que permitan controlar la biocorrosión, llegando así a alcanzar áreas de estudio en: modificación de materiales (J. Li et al., 2021), uso de métodos biológicos (competencia microbiológica) o derivados de microorganismos (Parthipan et al., 2018), amplia gamas de recubrimientos funcionales (materiales compuestos, nanoparticulados, recubrimientos inteligentes, orgánicos, etc.) (H. Cai et al., 2020; Deepa et al., 2019; Fayyad et al., 2019; González et al., 2019; Guo et al., 2018; Krishnamurthy et al., 2015; Zhai et al., 2018), modificaciones superficiales que permitan alcanzar propiedades de superhidrofobicidad al material (Du et al., 2019).

Acorde a las necesidades de reducir el impacto ambiental en tratamientos que mitigan la MIC, las alternativas actuales ofrecen tecnologías que muestran ser eficientes, eco-amigables y de fácil implementación; dicho esto, autores como (W. Cai et al., 2018; Lekbach et al., 2018; López-Ortega et al., 2019; Ouyang et al., 2020) han centrado sus estudios investigativos en crear recubrimientos que tengan cualidades de inhibición y/o propiedades antibacterianas, conservando y aumentando propiedades que pueden ofrecer materiales de uso convencional (e.g. recubrimiento

epóxico); otra de las opciones estudiadas es cambiar biocidas convencionales por aquellos que reduzcan el impacto ambiental.

Figura 6

Representación esquemática de inhibidores verdes.



Nota. a) Sistema corrosivo abiótico con picaduras con iones disueltos (Na^+ y Cl^-). b) Sistema corrosivo biótico con presencia de picaduras y formación de biofilms. c) Sistema de inhibición sobre el medio biótico con formación de capa protectora de moléculas del inhibidor. Adaptado de (Parthipan et al., 2021)

3.6 Tecnologías novedales empleadas para el control de la MIC

Aunque diferentes autores muestran que hay una variedad de técnicas para hacerle frente a la MIC, tal y como se mencionó anteriormente en este trabajo, las tecnologías que se encuentran en desarrollo y estudio principalmente se enfocan en los métodos que se describen a continuación.

3.6.1 Inhibidores y biocidas

Los inhibidores biológicos como su nombre lo indican son generalmente compuestos químicos que tiene la capacidad de prevenir la formación de biofilms en la superficie del metal, en muchos casos la comunicación directa entre los microorganismos (QS) se ve interrumpida, por lo que no facilita la formación de EPS entre estos mismos, impidiendo así el desarrollo de los

consorcios microbianos, proporcionando protección por medio de la inhibición que evita desencadenar un proceso biocorrosivo como se ilustra en la Figura 6. (B. J. Little et al., 2020; Packiavathy et al., 2019; Videla & Herrera, 2005). Así pues, es conocido que varios inhibidores tienen un efecto biocida sobre los microorganismos (desnaturalizan e incluso matan células microbianas) esto se relaciona con la generación de especies reactivas de oxígeno **ROS** (e.g. radicales hidroxilos, peróxidos) impidiendo el intercambio electroquímico entre las bacterias y la superficie metálica (Arunima et al., 2021; Deepa et al., 2019; Lekbach, Dong, et al., 2019).

3.6.2 *Materiales modificados*

Como se menciona anteriormente la idea consiste en obtener propiedades biocidas o inhibitorias sobre los compuestos que protegen al material, por lo que la modificación de materiales implica tomar un material convencional (en este caso matriz metálica) y realizar algunos cambios en su composición y/o morfología que denoten esas propiedades, ciertos casos indican que un mecanismo para combatir la biocorrosión consisten en generar ROS para combatir el desarrollo de biofilms. Por otra parte, se ha estudiado que iones metálicos como: Ag^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} y Sn^{2+} , tienen la capacidad de matar bacterias sésiles (W. Cai et al., 2018; J. Xu et al., 2018); por mencionar algunos ejemplos autores como (Shi et al., 2018) lograron adicionar partículas de cobre en un acero al carbono exhibiendo propiedades óptimas para combatir bacterias, (Deepa et al., 2019) incorporó nanopartículas de Mo-TiO₂ en un revestimiento galvanizado de zinc el cual tenía la función de proteger un acero al carbono.

3.6.3 *Recubrimientos*

Entre los métodos más comunes y de mayor antigüedad empleados para mitigar la MIC, consiste en el uso de recubrimientos de diferentes bases (poliméricas, metálicas, compuestas) este método de protección radica en la creación de una capa micrométrica que recubre la superficie del

material generando un aislamiento hacia el entorno corrosivo, es así, que el uso de recubrimientos de base polimérica (orgánica) y metálica (inorgánica) han sido de los más comunes y empleados para controlar la MIC; por medio de la adición de diferentes compuestos activos en pequeñas cantidades en la matriz del recubrimiento se puede alcanzar un mejor desempeño y mejorar la eficiencia, al considerar que logran ser más delgados que un recubrimiento polimérico sin alguna modificación (Guo et al., 2018; Pehkonen & Yuan, 2018a, pp. 338–346).

Las nuevas tecnologías han permitido concentrarse en el estudio y desarrollo de recubrimientos que proveen propiedades biocidas o inhibidoras al agregar aditivos (óxidos metálicos, nanopartículas compuestas, biocidas convencionales, entre otros) sin alterar las propiedades físicas del revestimiento independientemente si son de base polimérica o metálica.

Otra de las alternativas a considerar es el uso de nuevos materiales; un ejemplo que nos ofrece el autor (Krishnamurthy et al., 2015) es la creación de un recubrimiento a base de grafeno considerablemente más delgado que un recubrimiento polimérico convencional. Sin embargo, no sobra aclarar que los estudios relacionados con esta tecnología para combatir la MIC no se han dado del todo, mostrando así una posibilidad para indagar en la implementación de este material como una nueva opción ante este problema.

3.6.4 Superficies superhidrofóbica (SS's)

En los últimos años una de las tecnologías más estudiadas para diferentes aplicaciones industriales (e.g. Oil & Gas, textil, automotriz) radica en el desarrollo y modificación de las superficies en los materiales, de tal forma que exhiban un comportamiento superhidrofóbico al entrar en contacto con fluidos (Ijaola et al., 2020; Manoharan & Bhattacharya, 2019), una SS's se obtiene cuando se alcanzan ángulos de contacto con el agua (**WCA**) $> 150^\circ$ entre el líquido y el

material, además del ángulo de deslizamiento (**SA**) $<10^\circ$ (Ejenstam, 2015; Pehkonen & Yuan, 2018b, pp. 133–134).

Por medio de diferentes técnicas (etching, grabado químico, sol-gel, anodización, electrodeposición, etc.) para la creación de SS's se ha logrado entender y estudiar las aplicaciones que pueden tener un futuro prometedor en la industria. Considerando específicamente las aplicaciones en el área de estudio de este proyecto se pueden nombrar los trabajos realizados por autores como (Ferrari et al., 2019; Meena et al., 2020; Varshney et al., 2021; Vazirinasab et al., 2018; D. Zhang et al., 2016; Z. H. Zhang et al., 2018; Zhu & Wu, 2020) quienes han investigado la relación entre la propiedad superhidrofóbica de recubrimientos u otros materiales, que actúen controlando la corrosión de los metales y la protección ante ambientes marinos (Ferrari et al., 2019; Tsygankova et al., 2020); lo que directamente se puede asociar con superficies que previenen la formación del biofilm sobre el material a proteger, en otras palabras, la adquisición de propiedades antibiofouling en estos materiales (J. Li et al., 2021; Sun et al., 2018).

3.7 Estudios noveles de protección ante la MIC

Tal y como se mencionó, uno de los propósitos de este proyecto fue realizar la investigación acerca de las técnicas y tecnologías empleadas para la prevención, control y/o mitigación de la MIC en los últimos cuatro años (2018-2021). Para alcanzar este objetivo se hizo una revisión exhaustiva de los artículos científicos relacionados con el tema publicados en las revistas de las principales editoriales, mencionadas con antelación. A continuación, se hizo una preselección de los artículos que presentaban resultados originales.

En la tabla incluida en el Apéndice B se muestra los principales hallazgos de los artículos seleccionados incluyendo la clasificación según los métodos de protección empleados, materiales protegidos, sistemas de protección y microorganismos empleados en el estudio.

Finalmente, se seleccionaron a modo de ejemplo los quince (15) artículos más relevantes considerando factores como: eficiencia de inhibición, material a proteger, innovadores y de bajo impacto ambiental (enfoque bastante importante en la actualidad). Es entonces que en la Tabla 2 se listan en orden categórico y cronológico de tal forma que se facilite su relación con lo expuesto en la sección 3.6 Tecnologías noveles empleadas para el control de la MIC, expresando así el método de protección al que se relaciona, el título con su respectiva referencia bibliográfica, así mismo, el material sobre el cual fueron realizados los estudios y por último, el mecanismo de protección.

Tabla 2.

Registro de los métodos de prevención y protección más influyentes de los artículos seleccionados para estudios MIC.

<i>Método</i>	<i>Título y referencia</i>	<i>Material ensayado</i>	<i>Mecanismo de protección</i>
Inhibidores	Glycolipid biosurfactant as an eco-friendly microbial inhibitor for the corrosion of carbon steel in vulnerable corrosive bacterial strains. (Parthipan et al., 2018)	Acero al carbono API 5LX	Inhibidor microbiano ecológico compuesto de un biosurfactante BS de tipo glicolipídico (Ramnolípido) obtenido de las bacterias <i>Pseudomonas mosselii</i> .
	Catechin hydrate as an eco-friendly biocorrosion inhibitor for 304L stainless steel with dual-action antibacterial properties against <i>Pseudomonas aeruginosa</i> biofilm. (Lekbach, Dong, et al., 2019)	Acero inoxidable 304L	Inhibidor ecológico a base de Hidrato de catequina CH obtenido de la planta <i>Cistur ladanifer</i> .
	Mitigation of microbial biodeterioration and acid corrosion of pipework steel using Citrus reticulata peels extract mediated copper nanoparticles composite. (Ituen et al., 2020)	Acero al carbono API 5L X80	Inhibidor ecológico sintetizando nanopartículas de cobre a partir de extracto de cascara de <i>Citrus Reticulata</i> ETP-Cu NPs .
	Nanowall enclosed architecture infused by lubricant: A bio-inspired strategy for inhibiting bio-adhesion and bio-corrosion on stainless steel. (Ouyang et al., 2020)	Acero inoxidable 304	Inhibidor superhidrofóbico basado en la preparación de una superficie con una infusión de lubricante LIS .
	Constructing nanostructured functional film on EH40 steel surface for anti-adhesion of <i>Pseudomonas aeruginosa</i> . (Cheng et al., 2021)	Acero EH40 (acero de bajo carbono)	Inhibidor ecológico (Anodización en un solo paso en solución de NaOH) de una película funcional nanoestructurada (Componentes principales son α -Fe ₂ O ₃ y Fe ₃ O ₄).
	Glycyrrhiza glabra extract as an eco-friendly inhibitor for microbiologically influenced corrosion of API 5LX carbon steel in	Acero al carbono API 5LX	Inhibidor ecológico a base del extracto acuoso de <i>Glycyrrhiza glabra</i> GG .

<i>Método</i>	<i>Título y referencia</i>	<i>Material ensayado</i>	<i>Mecanismo de protección</i>
	oil well produced water environments. (Parthipan et al., 2021)		
Biocidas	Mitigating microbiologically influenced corrosion of an oilfield biofilm consortium on carbon steel in enriched hydrotest fluid using 2,2-dibromo-3-nitrilopropionamide (DBNPA) enhanced by a 14-mer peptide. (D. Wang, Ramadan, et al., 2020)	Acero al carbono C1018	Biocida ecológico a base de 2,2- dibromo-3-nitrilopropionamida DBNPA mejorado con Péptido A (Agente de dispersión de biopelículas).
	Microbial corrosion resistance of a novel Cu-bearing pipeline steel. (Shi et al., 2018)	Acero API 5L X80	Modificación de la aleación (acero grado X80 con 1% y 2% de Cu respectivamente).
Materiales modificados	Antifouling and anticorrosion properties of one-pot synthesized dedoped bromo-substituted polyaniline and its composite coatings. (W. Cai et al., 2018)	Acero dulce (bajo carbono)	Recubrimiento epóxico modificado, sintetizado químicamente (polimerización química oxidativa), adicionando: - Polianilina PANI . - Polianilina bromo-sustituida deducida Br-PANI .
Recubrimientos	Novel electroless deposited corrosion — resistant and anti-bacterial NiP–TiNi nanocomposite coatings. (Fayyad et al., 2019)	Acero al carbono API 5L X100	Recubrimiento nanocompuesto de TiNi en una matriz de NiP (matriz que se deposita auto catalíticamente).
	Development of a superhydrophobic and bactericide organic topcoat to be applied on thermally sprayed aluminum coatings in offshore submerged components. (López-Ortega et al., 2019)	Placas de acero de grado R4	Recubrimiento dúplex: Pulverización térmica por arco con una capa de aluminio TSA + Oxidación electrolítica por plasma PEO y Pintura epóxica (Carboguard® 890) + nanopartículas de SiO ₂ y un agente biocida (Cu ₂ O).
	Sulfide ions-induced release of biocides from a metal-phenolic supramolecular film fabricated on aluminum for inhibition of microbially influenced corrosion. (H. Cai et al., 2020)	Aluminio ≥99.99%	Biocida inducido por iones de sulfuro sobre una película inteligente supramolecular metal-fenólica (TCS@CTAB-(TA-Fe^{III})₂₀).
	Electrodeposition of capsaicin induced ZnO/Zn nanopillar films for marine antifouling and antimicrobial corrosion. (Zhai et al., 2020)	Acero al carbono Q235	Película por electrodeposición (Inducidos por un electrolito con adición de capsaicina) creando nano pilares de óxido de Zinc.
	Exploration of WO ₃ /BiVO ₄ composite based hot-dip zinc coating to combat biocorrosion (Arunima et al., 2021)	Acero dulce (bajo carbono)	Recubrimiento de (Galvanización en caliente HDG) de zinc basado en un compuesto biocida de WO ₃ /BiVO ₄ (WBV).
Superficies superhidrófobas	Preparation of Superhydrophobic Steel Surfaces with Chemical Stability and Corrosion. (Du et al., 2019)	Acero al carbono Q235	Tratamiento superficial superhidrofóbico mediante la formación de una estructura irregular en forma de agujas y tratamiento de fluoración usando (1H,1H,2H,2H-perfluorodecyl)-triethoxysilane (PFTEOS, 97%).

3.8 Evaluación y análisis de la viabilidad en los métodos de protección estudiados

De forma resumida se puede decir que hasta este punto se ha logrado explicar cuáles son los microorganismos de mayor relevancia, los factores que influyen directamente en la MIC y las principales categorías de los métodos que permiten prevenir, establecer control y/o brindar mitigación ante este fenómeno corrosivo. Es por esto que ahora para entender el alcance que tuvieron los estudios más influyentes seleccionados, se desglosó y comparó la información obtenida, por lo anterior, se logró obtener una noción de la viabilidad que tienen estos métodos noveles de protección y a través de un criterio ingenieril se consideró también la posibilidad de llevar estos estudios a pruebas piloto antes de ser implementados a escala industrial.

3.8.1 *Análisis y comparación de los métodos*

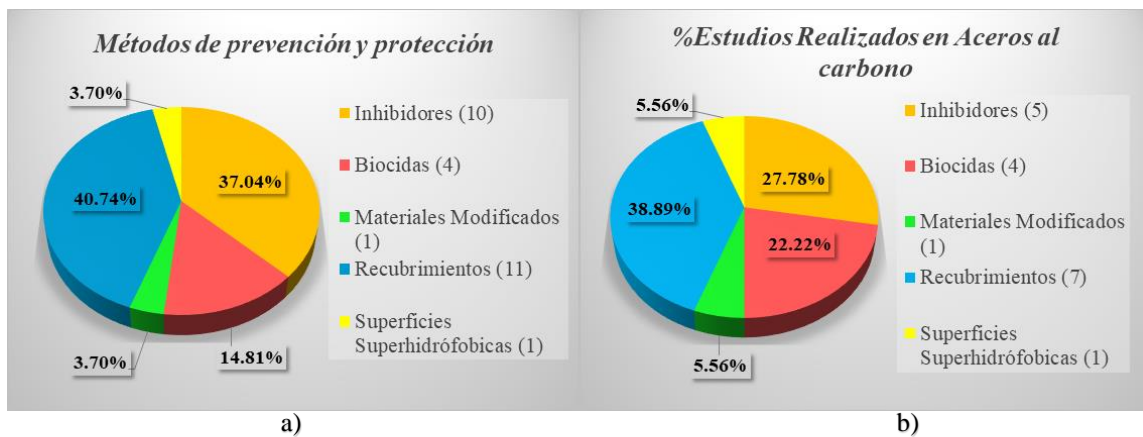
Con la categorización previamente establecida, se cuantificaron los estudios que realizaron los autores, como se observa en la Figura 7a de un total de veintisiete (27) estudios recientes que consideramos influyentes, la mayor cantidad se centra en la categoría de recubrimientos (11) en el cual la mayoría (5 de ellos) se asocian a recubrimientos modificados a través de nanocompuestos. Por otra parte, los inhibidores también juegan un papel importante pues constituye la segunda categoría más estudiada (10) entre las últimas tecnologías. Además, se puede establecer que en conjunto inhibidores y recubrimientos desempeñan el rol más influyente entre las nuevas tecnologías, formando parte de más del 77% de los estudios recientes analizados.

Como es conocido en el área de estudio relacionada con los materiales en general, es bastante importante realizar análisis físico-químicos que permitan establecer el comportamiento de ellos, principalmente cuando se presentan reacciones electro-químicas como lo es el caso de la corrosión (Askeland et al., 2012, pp. 854–860; Callister & Rethwisch, 2012, pp. 683–689). De la Figura 8

se logra deducir que el 81.48% de los estudios analizados realizaron una caracterización del mecanismo de protección mediante diferentes técnicas de análisis (FT-IR, EDAX, EDX, XPS, HPLC-Q-TOF-MS, TLC, Espectros Raman), que permiten entender cuales compuestos activos se forman y se presentan para hacer frente a la biocorrosión. Como era de esperarse y considerando que son estudios aplicados a un mecanismo de corrosión asociados con microorganismos, casi la totalidad de los artículos analizados (96.30%) realizaron estudios microbiológicos que permiten entender el comportamiento y la interacción de las células involucradas; sin embargo, y a pesar que el autor (Du et al., 2019) no realizó un estudio microbiológico fue posible analizar que las superficies superhidrofóbicas tienen propiedades antibiofouling (J. Li et al., 2021; Sun et al., 2018) lo que está directamente relacionado con la eficiencia de inhibición de la MIC, tal como lo demostraron los estudios de (López-Ortega et al., 2019; Ouyang et al., 2020). Además, para analizar el comportamiento de los mecanismos de protección con los microorganismos, generalmente se emplean estudios electroquímicos (e.g. OCP, LPR, EIS) que permiten observar el comportamiento corrosivo presente en el material estudiado, es por esto que el 92.59% de los autores los realizaron.

Figura 7

Cuantificación numérica y porcentual de los métodos de prevención y/o protección y la relación entre estudios con aceros al carbono según las categorías preestablecidas.



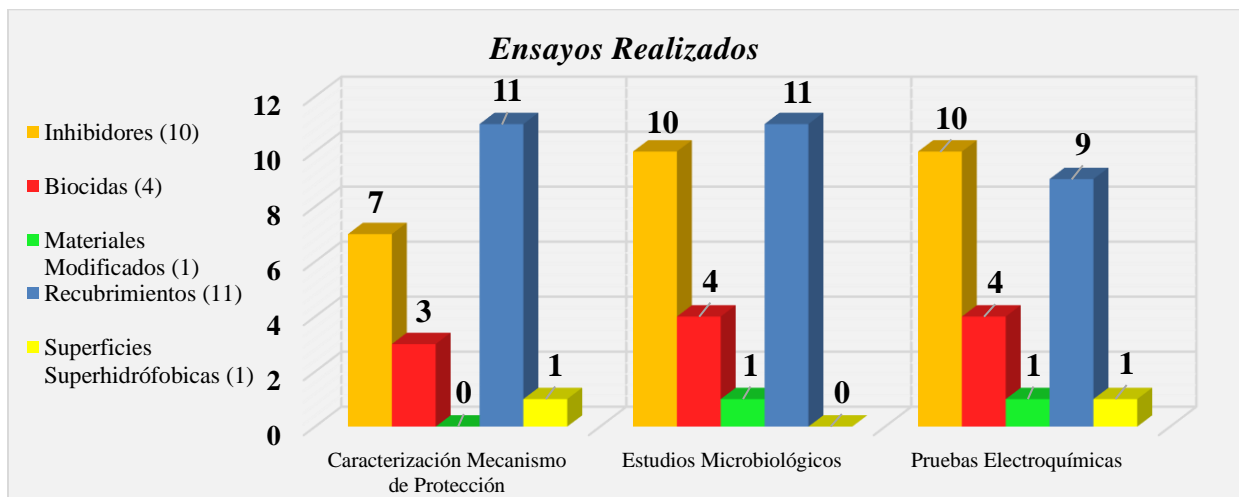
Nota: a) Cuantificación numérica y porcentual de cada una de las categorías de los métodos de prevención y/o protección estudiados. b) Cuantificación numérica y porcentual de la relación entre estudios con aceros al carbono según las categorías preestablecidas

En la figura presente en el Apéndice C se logra observar la relación de material estudiado con el método de protección utilizado, evidenciando que aproximadamente 2/3 de los estudios analizados tomaron como material de estudio un acero al carbono, mientras los estudios restantes analizaron la biocorrosión sobre otras aleaciones (aceros inoxidables y aleaciones de aluminios).

En la Figura 7b se observa la cuantificación porcentual existente entre aquellos artículos que utilizaron acero al carbono como material de estudio y los métodos previamente establecidos, donde se logra definir claramente que el 50% constituye en el uso de biocidas e inhibidores, mostrando que a pesar de que son métodos de prevención y mitigación bastante antiguos; en la actualidad, siguen siendo considerados como viables ante la MIC y por medio de nuevas tecnologías es de esperarse que el efecto contaminante ligado a estos sea contrarrestado, para así contribuir al avance de mecanismos de menor impacto ambiental.

Figura 8

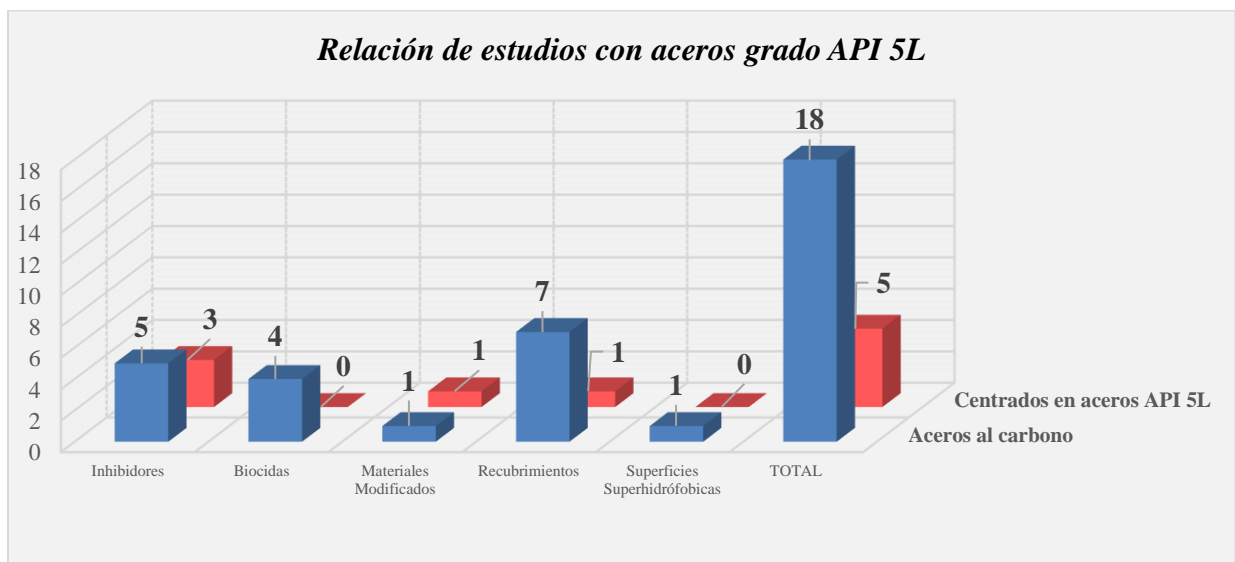
Cuantificación de diferentes pruebas (caracterización mecanismo de protección, estudios microbiológicos y pruebas electroquímicas) realizadas en las categorías preestablecidas.



Considerando que el enfoque de este estudio se basa en analizar las técnicas noveles de protección contra la MIC en tuberías de acero al carbono grado API 5L, la Figura 9 permite conocer la relación existente entre los aceros al carbono estudiados y cuantos de ellos son pertenecientes a este grado de acero; se evidenció que solo el 27.78% (5 artículos) realizan estudios en este material, lo cual conlleva a decir prematuramente que a pesar de los avances en las nuevas tecnologías sería recomendable ampliar este rango.

Figura 9

Cuantificación de la relación entre aceros al carbono y los especificados en aceros grado API 5L estudiados.



A partir de los artículos cuantificados, en un 51.85% de los estudios realizados se identificó un común denominador, en donde las nuevas tecnologías están enfocadas en disminuir la afectación ambiental causada por los métodos de prevención, control y/o mitigación de la MIC, aportando así alternativas que permitan implementar el uso de compuestos activos orgánicos CAO (e.g. el quitosano, la capsaicina, algunas EPS, etc.) que faciliten la bio-asimilación en los ecosistemas naturales de una forma más segura.

3.8.2 *Evaluación de la factibilidad*

En la presente sección se desglosa a mayor detalle los mecanismos de protección del común denominador entre los estudios más distintivos según sus características (eficiencia de inhibición, material estudiado e impacto ambiental) y que pueden considerarse factibles al momento de prevenir, controlar y/o mitigar la MIC en estudios in situ para así lograr llevarlos a escala industrial.

(Lekbach et al., 2018; Lekbach, Dong, et al., 2019; Lekbach, Li, et al., 2019; Packiavathy et al., 2019; Parthipan et al., 2021) establecen inhibidores considerados eco-amigables debido a que su mayoría son extractos de plantas (e.g. *Glycyrrhiza glabra* GG, *Salvia officinalis*, *Cistus ladanifer*, *Cuminum cyminum*) que tienen una alta adhesión a las paredes del metal debido a la presencia de compuestos heterocíclicos (polares), los cuales reemplazan las moléculas polares del agua adheridas en la superficie de los aceros; generalmente estos inhibidores contienen metabolitos secundarios (e.g. compuestos fenólicos, alcanos, flavonoides, polifenoles, etc.), los cuales tiene la capacidad de inhibir la corrosión pues sus estructuras se asimilan a las moléculas de inhibidores sintetizados orgánicos convencionales. La razón principal para considerar viables estas nuevas tecnologías ecológicas empleadas en inhibidores, se debe a que en la actualidad existen sistemas de inyección de inhibidores acoplados a las líneas de tubería en la industria Oil and Gas (Gutzeit, 2016, pp. 225–227), que permitirían la implementación fácil y efectiva de esto.

(Arunima et al., 2021; Fayyad et al., 2019; López-Ortega et al., 2019; Zhai et al., 2020) enfocaron sus estudios en la adición de nanocompuestos metálicos con propiedades biocidas sobre recubrimientos obtenidos por medio de diferentes métodos convencionales (e.g. electrodeposición, niquelado químico, galvanizado, aplicación por spray de recubrimiento epóxico) debido a que estos por sus dimensiones logran penetrar más fácilmente la membrana celular de las bacterias consiguiendo unirse a las enzimas y proteínas, logrando así alterar sus actividades metabólicas y

su desarrollo (Ituen et al., 2020; L. Wang et al., 2017), pues como se mencionó anteriormente, las nanopartículas metálicas empleadas son capaces de generar iones con la disposición de matar bacterias sésiles (W. Cai et al., 2018; J. Xu et al., 2018); además, la eficiencia de inhibición también se atribuye a los elementos presentes en los compuestos metálicos, los cuales permiten la liberación de especies reactivas de oxígeno **ROS** que al entrar en contacto con la membrana celular atacan a los fosfolípidos poliinsaturados derivando una aniquilación celular (Arunima et al., 2021; Deepa et al., 2019; Lekbach, Dong, et al., 2019; López-Ortega et al., 2019; Shi et al., 2018). Dicho esto, los recubrimientos con adición de nanocompuestos se consideran viables siempre y cuando el método de fabricación utilizado no exceda las tecnologías actuales empleadas a nivel industrial. Ahora, (López-Ortega et al., 2019) logró sintetizar un recubrimiento con nanocompuestos de SiO_2 y Cu_2O , alcanzando propiedades superhidrofóbicas que impiden la adherencia de bacterias sésiles en 64.53% y suprimiendo en un 99.99% los microorganismos que alcanzaron establecerse; tal y como el autor mencionó, consideramos que nuevas tecnologías deben centrarse en investigar nanocompuestos de CuO_2 y ZrO_2 , pues muestran propiedades prometedoras para aplicaciones en biocidas.

Aunque ya se conoce que las nanopartículas ofrecen soluciones óptimas para combatir la MIC, (Rasheed, Jabbar, Rasool, et al., 2019; Rasool et al., 2018) nos ofrecen una clara idea que el uso de **NPs** de ZnO debe limitarse, pues su toxicidad biológica genera un impacto ambiental; sin embargo, al emplear nanocompuestos entrelazados empleando quitosano con ZnO NPs, estos son capaces de reducir el impacto ambiental en la biota marina, así mismo, es de resaltar que la eficiencia de inhibición puede alcanzar valores hasta del 73.4%, dependiendo de la concentración de quitosano en el nanocompuesto.

Por último, aunque (Shi et al., 2018) no sintetizó un recubrimiento con las propiedades descritas previamente, si logró modificar la composición de un acero al carbono de grado API 5L X80 sin alterar considerablemente sus propiedades mecánicas, a través de la adición de 1% de cobre y empleando un tratamiento térmico de envejecimiento, lo que causó un endurecimiento por precipitado de las nanopartículas enriquecidas de Cu en la matriz metálica. Este método de protección basado en la modificación de la composición química de los metales, desde el punto de vista metalúrgico representa una alternativa con alta viabilidad. No obstante, se considera pertinente realizar mayores estudios en este método, pues la información obtenida de estos estudios no representa una cantidad relevante en el área.

Teniendo en cuenta el análisis de los diferentes estudios para la prevención, control y/o mitigación de la MIC durante el desarrollo de este proyecto, debemos considerar y decir que las nuevas tecnologías deben centrarse en estudiar métodos de prevención, capaces de lograr desarrollar la alta eficiencia inhibitoria que brindan los nanocompuestos metálicos en conjunto con CAO, debido a que esta beneficiosa relación demuestra ser una alternativa para reducir el impacto ambiental; además, considerar que algunos nanocompuestos metálicos son altamente factibles para la obtención de superficies con propiedades superhidrofóbicas, pues previamente fue mencionado que esta propiedad impide la adherencia de microorganismos en las superficies. Consideramos que investigaciones que combinen estas tres tecnologías, pueden ser el futuro para prevenir, controlar y/o mitigar la MIC. Aunque no es el enfoque de este estudio, debemos mencionar que estas tecnologías pueden llegar a ser beneficiosas para el desarrollo a nivel mundial, alcanzando incluso a contribuir con los objetivos propuestos en la agenda de desarrollo sostenible para el 2030 según la ONU.

4. Conclusiones

La metodología empleada en este estudio permitió identificar a grandes rasgos los factores ambientales (físicos, químicos y/o físico-químicos) más relevantes que contribuyen al desarrollo y establecimiento del biofilm microbiano en los materiales, por ende en los aceros de grado API 5L, siendo estos: la humedad (actividad acuosa o humedad relativa), grado de turbulencia del fluido, temperatura, presión (hidrostática y osmótica), disponibilidad lumínica, aireación o ventilación, pH del medio, disponibilidad de aceptadores de electrones, disponibilidad de nutrientes en el medio (iones disueltos), presencia de sales, potencial electroquímico (Redox); además, de ciertas propiedades de los materiales en donde se presenta dicho consorcio microbiano: carga superficial, tensión superficial, mojabilidad, porosidad, rugosidad y la composición química.

De igual forma, se logró identificar los agentes microbiológicos (microorganismos) que afectan en gran parte los procesos de biocorrosión causada por diferentes mecanismos (EET-MIC y M-MIC), en donde las bacterias hacen parte de estos microorganismos siendo así los más agresivos ante la MIC; los estudios demostraron que las de mayor influencia son las SRB y las *Pseudomonas*, no obstante, no hay que descartar procesos corrosivos que se generan por microorganismos como: NRB, APB, SOB, IOB y bacterias metanógenas, Arqueas, Algas y Hongos.

Al realizar un análisis de las técnicas más empleadas para la prevención, control y/o mitigación de la MIC, se logró realizar una clasificación que permitió categorizar de forma fácil y sencilla las técnicas noveles estudiadas en los últimos años (2018-2021), por medio de 5 categorías, las cuales son: inhibidores, biocidas, materiales modificados, recubrimientos y

superficies superhidrofóbicas SS's. Donde los inhibidores y los recubrimientos abarcaron el 77.78% de los estudios analizados que fueron considerados relevantes y de impacto.

Al entender que las principales técnicas novedades para combatir la MIC se dividen en las 5 categorías mencionadas, se lograron realizar análisis de tipo cualitativo y cuantitativo que permitieron identificar cuáles son las tecnologías más viables y que pueden alcanzar a implementarse de forma eficiente y oportuna en las tuberías que empleen aceros al carbono de grado API 5L.

Las nuevas tecnologías de inhibidores se centran en emplear CAO extraídos de plantas con el objetivo de reemplazar compuestos convencionales (inorgánicos), logrando así disminuir la toxicidad y favorecer la bio-asimilación en los ecosistemas; así mismo, los biocidas que van de la mano de la anterior tecnología mencionada, buscan alcanzar el mismo objetivo, sin embargo, las eficiencias obtenidas ante la presencia de microorganismos son relativamente bajas, es entonces que los estudios están enfocados en mejorar significativamente esta propiedad.

Sin duda, los recubrimientos desempeñan un papel importante al momento de combatir la MIC, pues una mayoría considerable de los estudios analizados (8) se centraron en el desarrollo de revestimientos adicionando compuestos y/o nanocompuestos metálicos, pues estos tienen la función de actuar como inhibidores y/o biocidas ante la presencia de microorganismos, logrando así controlar los procesos corrosivos relacionados con la MIC. Es de resaltar que ciertos nanocompuestos metálicos pueden ofrecer propiedades superhidrofóbicas, lo que está relacionado con una de las más recientes tecnologías estudiadas, la función de estas superficies es inhibir la formación del biofilm en los materiales, permitiendo de forma intrínseca combatir la MIC antes de su desarrollo.

Por otra parte, la implementación de materiales modificados (aceros modificados) que permitan combatir la MIC es baja; a pesar, que muestran resultados favorables, los estudios realizados solo constituyen un 3.70%, no obstante, consideramos pertinente realizar mayores estudios que permitan medir el alcance real de este método.

5. Recomendaciones

A partir de los análisis realizados y de los criterios seleccionados para la evaluación de los diferentes métodos de protección y/o prevención de la MIC, consideramos que las próximas investigaciones deben emplear estudios que combinen las tres tecnologías mencionadas (NPs, CAO y SS's), así mismo, se podría indagar el uso de materiales modificados como método alternativo. Para lo anterior, se debe considerar la ejecución de estudios que además de contemplar la caracterización de los materiales y las pruebas electro-químicas, empleen estudios microbiológicos que permitan entender a fondo el comportamiento de los consorcios microbianos; adicionalmente, como las nuevas tecnologías buscan mitigar el impacto ambiental, sugerimos que se deben realizar estudios que permitan ejecutar una medición cuantitativa del impacto real que puede causar emplear estas tecnologías en un entorno a nivel industrial. Por lo mismo, sugerimos que de ser escalables estas tecnologías se deben realizar pruebas piloto en ambientes complejos, para así lograr evaluar su comportamiento real. Para finalizar, las nuevas tecnologías deben enfocarse en la mejora de métodos que se empleen actualmente como los analizados en este proyecto, pues los materiales o compuestos “milagrosos” conllevan años e incluso décadas de estudios antes de ser implementables en la industria en general.

Referencias

- Al-Sultani, K. F., Khulief, Z. T., & Hasan, A. A. (2021). Characterization of microbiological influence corrosion for API 5L X46 pipeline by sulphate-reducing bacteria (SRB). *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.301>
- An, B. A., Kleinbub, S., Ozcan, O., & Koerdt, A. (2020). Iron to Gas: Versatile Multiport Flow-Column Revealed Extremely High Corrosion Potential by Methanogen-Induced Microbiologically Influenced Corrosion (Mi-MIC). *Frontiers in Microbiology*, *11*(March), 1–12. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00527>
- API. (2011). Damage mechanisms affecting fixed equipment in the refining industry. In *API Recommended practice 571* (Second, Issue 489). API Publishing Services.
- API. (2018). *Line Pipe* (Forty Sixt, Issue April). API Publishing Services.
- Arunima, S. R., Deepa, M. J., Nair, A. J., & Shibli, S. M. A. (2021). Exploration of WO₃/BiVO₄ composite based hot-dip zinc coating to combat biocorrosion. *Materials Science and Engineering: B*, *271*(January), 115302. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2021.115302>
- Askeland, D. R., Fulay, P. P., & Wright, W. J. (2012). *Ciencia e Ingenieria de Materiales* (R. D. Zendejas & O. A. Ramírez (eds.); Sexta). Cengage Learning Inc.
- Beech, I. B., Sztyler, M., Gaylarde, C. C., Smith, W. L., & Sunner, J. (2015). Biofilms and biocorrosion. In T. Liengen, R. Basséguy, D. Féron, & I. B. Beech (Eds.), *Understanding Biocorrosion: Fundamentals and Applications* (First Edit, pp. 33–56). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1533/9781782421252.1.33>
- Bertron, A. (2014). Understanding interactions between cementitious materials and microorganisms: a key to sustainable and safe concrete structures in various contexts.

Materials and Structures/Materiaux et Constructions, 47(11), 1787–1806.

<https://doi.org/10.1617/s11527-014-0433-1>

Borenstein, S. W. (1994). *Microbiologically Influenced Corrosion Handbook* (Fist). Woohhead Publishing Limited.

Brasca, M., Morandi, S., Lodi, R., & Tamburini, A. (2007). Redox potential to discriminate among species of lactic acid bacteria. *Journal of Applied Microbiology*, 103(5), 1516–1524.

<https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2007.03392.x>

Brown, D. C., & Turner, R. J. (2019). Biofilms and Microbiologically Influenced Corrosion in the Petroleum Industry [Chapter]. In R. K. Sani & N. K. Rathiman (Eds.), *Introduction to biofilm engineering* (Vol. 1323, pp. 187–203). American Chemical Society.

<https://doi.org/10.1021/bk-2019-1323.ch009>

Burt, V. (2015). Microbiologically influenced corrosion (MIC). In V. Burt (Ed.), *Corrosion in petrochemical industry. Second Edition* (Second, pp. 45–61). ASM International.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101105-8.00008-5>

Cai, H., Wang, P., Chen, X., Wang, Y., & Zhang, D. (2020). Sulfide ions-induced release of biocides from a metal-phenolic supramolecular film fabricated on aluminum for inhibition of microbially influenced corrosion. *Corrosion Science*, 167(February), 108534.

<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108534>

Cai, W., Wang, J., Quan, X., Zhao, S., & Wang, Z. (2018). Antifouling and anticorrosion properties of one-pot synthesized dedoped bromo-substituted polyaniline and its composite coatings. *Surface and Coatings Technology*, 334, 7–18.

<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.10.076>

Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2012). *Materials Science and Engineering An*

- Introduction. In D. Fowley, D. Sayre, & J. Knecht (Eds.), *Coordination Polymers and Metal Organic Frameworks: Properties, Types and Applications* (Ninth). John Wiley & Sons, Inc.
- Cheng, X., Shi, J., Wang, W., Liao, H., Chen, S., Liu, G., & Chen, J. (2021). Constructing nanostructured functional film on EH40 steel surface for anti-adhesion of *Pseudomonas aeruginosa*. *Surface and Coatings Technology*, 405(November 2020), 126683.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126683>
- Chugh, B., Thakur, S., & Singh, A. K. (2020). Microbiologically Influenced Corrosion Inhibition in Oil and Gas Industry. In *Corrosion Inhibitors in the Oil and Gas Industry* (pp. 321–338). John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9783527822140.ch13>
- Cicek, V. (2014). Corrosion of Materials. In *Corrosion Engineering* (First, pp. 1–19). John Willey & Sons.
- Curling, S. F., Clausen, C. A., & Winandy, J. E. (2002). Experimental method to quantify progressive stages of decay of wood by basidiomycete fungi. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 49(1), 13–19. [https://doi.org/10.1016/S0964-8305\(01\)00101-9](https://doi.org/10.1016/S0964-8305(01)00101-9)
- Dall’Agnol, L. T., & Moura, J. J. G. (2015). Sulphate-reducing bacteria (SRB) and biocorrosion. In T. Liengen, R. Basséguy, D. Féron, & I. B. Beech (Eds.), *Understanding Biocorrosion: Fundamentals and Applications* (First Edit, pp. 77–106). Woodhead Publishing Limited.
<https://doi.org/10.1533/9781782421252.1.77>
- Deepa, M. J., Arunima, S. R., Riswana, G., Riyas, A. H., Sha, M. A., Suneesh, C. V., & Shibli, S. M. A. (2019). Exploration of Mo incorporated TiO₂ composite for sustained biocorrosion control on zinc coating. *Applied Surface Science*, 494(July), 361–376.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.07.086>
- Dong, Y., Jiang, B., Xu, D., Jiang, C., Li, Q., & Gu, T. (2018). Severe microbiologically

influenced corrosion of S32654 super austenitic stainless steel by acid producing bacterium *Acidithiobacillus caldus* SM-1. *Bioelectrochemistry*, 123, 34–44.

<https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2018.04.014>

Dou, W., Liu, J., Cai, W., Wang, D., Jia, R., Chen, S., & Gu, T. (2019). Electrochemical investigation of increased carbon steel corrosion via extracellular electron transfer by a sulfate reducing bacterium under carbon source starvation. *Corrosion Science*, 150(October 2018), 258–267. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.02.005>

Du, C., He, X., Tian, F., Bai, X., & Yuan, C. (2019). Preparation of superhydrophobic steel surfaces with chemical stability and corrosion. *Coatings*, 9(6), 1–10.

<https://doi.org/10.3390/COATINGS9060398>

Eduok, U., Faye, O., & Szpunar, J. (2018). Effect of benzothiazole biocide on SRB-induced biocorrosion of hot-dip galvanized steel. *Engineering Failure Analysis*, 93(April), 111–121.

<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.07.008>

Eduok, U., Ohaeri, E., & Szpunar, J. (2019). Accelerated corrosion of pipeline steel in the presence of *Desulfovibrio desulfuricans* biofilm due to carbon source deprivation in CO₂ saturated medium. *Materials Science and Engineering C*, 105(December 2018), 110095.

<https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.110095>

Ejenstam, L. (2015). *Hydrophobic and superhydrophobic coatings for corrosion protection of steel*.

Fayyad, E. M., Hassan, M. K., Rasool, K., Mahmoud, K. A., Mohamed, A. M. A., Jarjoura, G., Farhat, Z., & Abdullah, A. M. (2019). Novel electroless deposited corrosion — resistant and anti-bacterial NiP–TiNi nanocomposite coatings. *Surface and Coatings Technology*, 369(April), 323–333. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.04.064>

- Ferrari, M., Benedetti, A., & Cirisano, F. (2019). Superhydrophobic coatings from recyclable materials for protection in a real sea environment. *Coatings*, 9(5).
<https://doi.org/10.3390/coatings9050303>
- Flemming, H. C., Wingender, J., Szewzyk, U., Steinberg, P., Rice, S. A., & Kjelleberg, S. (2016). Biofilms: An emergent form of bacterial life. *Nature Reviews Microbiology*, 14(9), 563–575. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2016.94>
- Gadd, G. M., & Dyer, T. D. (2017). Bioprotection of the built environment and cultural heritage. *Microbial Biotechnology*, 10(5), 1152–1156. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12750>
- Garrett, T. R., Bhakoo, M., & Zhang, Z. (2008). Bacterial adhesion and biofilms on surfaces. *Progress in Natural Science*, 18(9), 1049–1056. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2008.04.001>
- Gaylarde, C., Ribas Silva, M., & Warscheid, T. (2003). Microbial impact on building materials: An overview. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 36(259), 342–352.
<https://doi.org/10.1617/13867>
- Gehlot, P., & Singh, J. (2018). Fungi and their role in sustainable development: Current perspectives. In *Fungi and their Role in Sustainable Development: Current Perspective*.
<https://doi.org/10.1007/978-981-13-0393-7>
- González, E. A., Leiva, N., Vejar, N., Sancy, M., Gulppi, M., Azócar, M. I., Gomez, G., Tamayo, L., Zhou, X., Thompson, G. E., & Páez, M. A. (2019). Sol-gel coatings doped with encapsulated silver nanoparticles: Inhibition of biocorrosion on 2024-T3 aluminum alloy promoted by *Pseudomonas aeruginosa*. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(2), 1809–1818. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.12.011>
- Gu, T. (2012). New understandings of biocorrosion mechanisms and their classifications. *Journal of Microbial and Biochemical Technology*, 4(4). <https://doi.org/10.4172/1948->

5948.1000e107

- Gu, T., Jia, R., Unsal, T., & Xu, D. (2019). Toward a better understanding of microbiologically influenced corrosion caused by sulfate reducing bacteria. *Journal of Materials Science and Technology*, 35(4), 631–636. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.10.026>
- Guo, J., Yuan, S., Jiang, W., Lv, L., Liang, B., & Pehkonen, S. O. (2018). Polymers for combating biocorrosion. *Frontiers in Materials*, 5(March), 1–15. <https://doi.org/10.3389/fmats.2018.00010>
- Gutzeit, J. (2016). Overhead Inhibition Injection. In *Crude Unit Corrosion Guide - A Manual for Plant Operators, Process Engineers, Metallurgists, Maintenance Engineers, Inspectors, and Equipment Specialists* (Third, pp. 221–231). Nace International. <https://doi.org/978-1-57590-330-9>
- Hashemi, S. J., Bak, N., Khan, F., Hawboldt, K., Lefsrud, L., & Wolodko, J. (2018). Bibliometric analysis of microbiologically influenced corrosion (MIC) of oil and gas engineering systems. *Corrosion*, 74(April), 468–486. <https://doi.org/10.5006/2620>
- Ijaola, A. O., Farayibi, P. K., & Asmatulu, E. (2020). Superhydrophobic coatings for steel pipeline protection in oil and gas industries: A comprehensive review. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 83(July), 103544. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103544>
- Ituen, E., Ekemini, E., Yuanhua, L., Li, R., & Singh, A. (2020). Mitigation of microbial biodeterioration and acid corrosion of pipework steel using *Citrus reticulata* peels extract mediated copper nanoparticles composite. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 149(November 2019), 104935. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2020.104935>
- Javaherdashti, R. (2008). *Microbiologically influenced corrosion: an engineering insight* (B.

Derby (ed.); First Edit). CRC Press.

Jia, R., Unsal, T., Xu, D., Lekbach, Y., & Gu, T. (2019). Microbiologically influenced corrosion and current mitigation strategies: A state of the art review. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 137(November 2018), 42–58.

<https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2018.11.007>

Khan, M. I., & Islam, M. R. (2007). The Petroleum Engineering Handbook: Sustainable Operation. In *The Petroleum Engineering Handbook: Sustainable Operations* (First Edit). Gulf Publishing Company. <https://doi.org/10.1016/c2013-0-15518-3>

Khouzani, M. K., Bahrami, A., Hosseini-Abari, A., Khandouzi, M., & Taheri, P. (2019). Microbiologically influenced corrosion of a pipeline in a petrochemical plant. *Metals*, 9(4), 1–14. <https://doi.org/10.3390/met9040459>

Kokilaramani, S., Al-ansari, M. M., Rajasekar, A., Al-khattaf, F. S., Hussain, A., & Govarthanan, M. (2020). Microbial influenced corrosion of processing industry by re-circulating waste water and its control measures - A review. *Chemosphere*, 2020, 16. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129075>

Krishnamurthy, A., Gadhamshetty, V., Mukherjee, R., Natarajan, B., Eksik, O., Ali Shojaee, S., Lucca, D. A., Ren, W., Cheng, H. M., & Koratkar, N. (2015). Superiority of graphene over polymer coatings for prevention of microbially induced corrosion. *Scientific Reports*, 5, 1–12. <https://doi.org/10.1038/srep13858>

Lekbach, Y., Dong, Y., Li, Z., Xu, D., El Abed, S., Yi, Y., Li, L., Ibsouda Koraichi, S., Sun, T., & Wang, F. (2019). Catechin hydrate as an eco-friendly biocorrosion inhibitor for 304L stainless steel with dual-action antibacterial properties against *Pseudomonas aeruginosa* biofilm. *Corrosion Science*, 157(May), 98–108. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.05.021>

- Lekbach, Y., Li, Z., Xu, D., El Abed, S., Dong, Y., Liu, D., Gu, T., Koraichi, S. I., Yang, K., & Wang, F. (2019). Salvia officinalis extract mitigates the microbiologically influenced corrosion of 304L stainless steel by Pseudomonas aeruginosa biofilm. *Bioelectrochemistry*, 128, 193–203. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2019.04.006>
- Lekbach, Y., Xu, D., El Abed, S., Dong, Y., Liu, D., Khan, M. S., Ibsouda Koraichi, S., & Yang, K. (2018). Mitigation of microbiologically influenced corrosion of 304L stainless steel in the presence of Pseudomonas aeruginosa by Cistus ladanifer leaves extract. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 133(June), 159–169. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2018.07.003>
- Li, J., Yuan, T., Zhou, C., Chen, B., Shuai, Y., Wu, D., Chen, D., Luo, X., Cheng, Y. F., & Liu, Y. (2021). Facile Li-Al layered double hydroxide films on Al alloy for enhanced hydrophobicity, anti-biofouling and anti-corrosion performance. *Journal of Materials Science and Technology*, 79, 230–242. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.10.072>
- Li, Y., Xu, D., Chen, C., Li, X., Jia, R., Zhang, D., Sand, W., Wang, F., & Gu, T. (2018). Anaerobic microbiologically influenced corrosion mechanisms interpreted using bioenergetics and bioelectrochemistry: A review. *Journal of Materials Science and Technology*, 34(10), 1713–1718. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.02.023>
- Liduino, V., Galvão, M., Brasil, S., & Sérvulo, E. (2021). SRB-mediated corrosion of marine submerged AISI 1020 steel under impressed current cathodic protection. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 202(January). <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2021.111701>
- Little, B. B., & Ray, R. (2001). Fungal-Influenced Corrosion of Metals in Humid Environments. In J. G. Stoecker (Ed.), *A Practical Manual on Microbiologically Influenced Corrosion, Volume 2* (Second, pp. 2.1-2.6). Nace International.

- Little, B. J., Blackwood, D. J., Hinks, J., Lauro, F. M., Marsili, E., Okamoto, A., Rice, S. A., Wade, S. A., & Flemming, H. C. (2020). Microbially influenced corrosion—Any progress? *Corrosion Science*, *170*(November 2019), 108641.
<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108641>
- Little, Brenda J., & Lee, J. S. (2007). *Microbiologically Influenced Corrosion* (First Edit). John Wiley & Sons, Inc.
- Liu, B., Li, Z., Yang, X., Du, C., & Li, X. (2020). Microbiologically influenced corrosion of X80 pipeline steel by nitrate reducing bacteria in artificial Beijing soil. *Bioelectrochemistry*, *135*, 107551. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2020.107551>
- Liu, T., & Cheng, Y. F. (2017). The influence of cathodic protection potential on the biofilm formation and corrosion behaviour of an X70 steel pipeline in sulfate reducing bacteria media. *Journal of Alloys and Compounds*, *729*, 180–188.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.09.181>
- López-Ortega, A., Areitioaurtena, O., Alves, S. A., Goitandia, A. M., Elexpe, I., Arana, J. L., & Bayón, R. (2019). Development of a superhydrophobic and bactericide organic topcoat to be applied on thermally sprayed aluminum coatings in offshore submerged components. *Progress in Organic Coatings*, *137*(October 2018), 105376.
<https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.105376>
- Loto, C. A. (2017). Microbiological corrosion: mechanism, control and impact—a review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *92*(9–12), 4241–4252.
<https://doi.org/10.1007/s00170-017-0494-8>
- Manoharan, K., & Bhattacharya, S. (2019). Superhydrophobic surfaces review: Functional application, fabrication techniques and limitations. *Journal of Micromanufacturing*, *2*(1),

59–78. <https://doi.org/10.1177/2516598419836345>

Meena, M. K., Tudu, B. K., Kumar, A., & Bhushan, B. (2020). Development of polyurethane-based superhydrophobic coatings on steel surfaces. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 378(2167).

<https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0446>

Meisner, T. O., & Leffler, W. L. (2006). *Oil & Gas pipelines in nontechnical language* (M. Patterson (ed.)). PennWell Corporation.

NACE International. (2016). *TM 0106 - 2016 Detection, testing, and evaluation of Microbiologically Influenced Corrosion (MIC) on external surfaces of buried pipelines* (Issue 21248). Nace International.

NACE International. (2018). Detection , Testing , and Evaluation of Microbiologically Influenced Corrosion on Internal Surfaces of pipeline. In *Detection, Testing, and Evaluation of Microbiologically Influenced Corrosion on Internal Surfaces of Pipelines* (Vols. TM0212-201, Issue 21248).

O'Toole, G. O., Kaplan, H. B., & Kolter, R. (2000). *Biofilm formation as microbial development*. 49–79.

Othmer, K. (1994). Microbiologically Influenced Corrosion Testing. In *Encyclopedia of Chemical Technology* (Issue Mic, pp. 1–38). John Wiley & Sons, Inc.

<https://doi.org/10.1520/stp1232-eb>

Ouyang, Y., Zhao, J., Qiu, R., Hu, S., Niu, H., Zhang, Y., & Chen, M. (2020). Nanowall enclosed architecture infused by lubricant: A bio-inspired strategy for inhibiting bio-adhesion and bio-corrosion on stainless steel. *Surface and Coatings Technology*, 381, 125143. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125143>

- Packiavathy, I. A. S. V., Maruthamuthu, S., Gnanaselvan, G., Manoharan, S., Paul, J. B. J., Annapoorani, A., Kannappan, A., & Ravi, A. V. (2019). The control of microbially induced corrosion by methyl eugenol – A dietary phytochemical with quorum sensing inhibitory potential. *Bioelectrochemistry*, *128*, 186–192.
<https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2019.04.010>
- Pakiet, M., Kowalczyk, I., Leiva Garcia, R., Moorcroft, R., Nichol, T., Smith, T., Akid, R., & Brycki, B. (2019). Gemini surfactant as multifunctional corrosion and biocorrosion inhibitors for mild steel. *Bioelectrochemistry*, *128*, 252–262.
<https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2019.04.005>
- Parthipan, P., Cheng, L., & Rajasekar, A. (2021). Glycyrrhiza glabra extract as an eco-friendly inhibitor for microbiologically influenced corrosion of API 5LX carbon steel in oil well produced water environments. *Journal of Molecular Liquids*, 115952.
<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.115952>
- Parthipan, P., Sabarinathan, D., Angaiah, S., & Rajasekar, A. (2018). Glycolipid biosurfactant as an eco-friendly microbial inhibitor for the corrosion of carbon steel in vulnerable corrosive bacterial strains. *Journal of Molecular Liquids*, *261*(2017), 473–479.
<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.04.045>
- Pehkonen, S. O., & Yuan, S. (2018a). Novel Antibacterial Coatings for Biofouling and Biocorrosion Inhibition. In *Interface Science and Technology* (Vol. 23, pp. 257–372).
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813584-6.00008-9>
- Pehkonen, S. O., & Yuan, S. (2018b). Superhydrophobic Film Coatings for Corrosion Inhibition. In *Interface Science and Technology* (Vol. 23, pp. 133–184). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813584-6.00006-5>

- Pereira, M. A., Alves, M. M., Azeredo, J., Mota, M., & Oliveira, R. (2000). Influence of physico-chemical properties of porous microcarriers on the adhesion of an anaerobic consortium. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 24(3), 181–186.
<https://doi.org/10.1038/sj.jim.2900799>
- Qian, H., Zhang, D., Lou, Y., Li, Z., Xu, D., Du, C., & Li, X. (2018). Laboratory investigation of microbiologically influenced corrosion of Q235 carbon steel by halophilic archaea *Natronorubrum tibetense*. *Corrosion Science*, 145, 151–161.
<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.09.020>
- Raghupathi, P. K., Liu, W., Sabbe, K., Houf, K., Burmølle, M., & Sørensen, S. J. (2018). Synergistic interactions within a multispecies biofilm enhance individual species protection against grazing by a pelagic protozoan. *Frontiers in Microbiology*, 8(January), 1–11.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02649>
- Rasheed, P. A., Jabbar, K. A., Mackey, H. R., & Mahmoud, K. A. (2019). Recent advancements of nanomaterials as coatings and biocides for the inhibition of sulfate reducing bacteria induced corrosion. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 25, 35–42.
<https://doi.org/10.1016/j.coche.2019.06.003>
- Rasheed, P. A., Jabbar, K. A., Rasool, K., Pandey, R. P., Sliem, M. H., Helal, M., Samara, A., Abdullah, A. M., & Mahmoud, K. A. (2019). Controlling the biocorrosion of sulfate-reducing bacteria (SRB) on carbon steel using ZnO/chitosan nanocomposite as an eco-friendly biocide. *Corrosion Science*, 148(July 2018), 397–406.
<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.12.028>
- Rasool, K., Nasrallah, G. K., Younes, N., Pandey, R. P., Abdul Rasheed, P., & Mahmoud, K. A. (2018). “Green” ZnO-Interlinked Chitosan Nanoparticles for the Efficient Inhibition of

- Sulfate-Reducing Bacteria in Inject Seawater. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 6(3), 3896–3906. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b04248>
- Shahryari, Z., Gheisari, K., & Motamedi, H. (2019). Effect of sulfate reducing *Citrobacter* sp. strain on the corrosion behavior of API X70 microalloyed pipeline steel. *Materials Chemistry and Physics*, 236(April), 121799. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.121799>
- Shi, X., Yan, W., Xu, D., Yan, M., Yang, C., Shan, Y., & Yang, K. (2018). Microbial corrosion resistance of a novel Cu-bearing pipeline steel. *Journal of Materials Science and Technology*, 34(12), 2480–2491. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.05.020>
- Skovhus, T. L. (2017). Microbiologically influenced corrosion in the upstream oil and gas industry. In T. L. Skovhus, D. Enning, & J. S. Lee (Eds.), *Microbiologically Influenced Corrosion in the Upstream Oil and Gas Industry* (First Edit). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315157818>
- Stanaszek-Tomal, E. (2020). Environmental factors causing the development of microorganisms on the surfaces of national cultural monuments made of mineral building materials—review. *Coatings*, 10(12), 1–19. <https://doi.org/10.3390/coatings10121203>
- Sun, K., Yang, H., Xue, W., He, A., Zhu, D., Liu, W., Adeyemi, K., & Cao, Y. (2018). Anti-biofouling superhydrophobic surface fabricated by picosecond laser texturing of stainless steel. *Applied Surface Science*, 436, 263–267. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.12.012>
- Telegdi, J., Shaban, A., & Trif, L. (2017). Microbiologically influenced corrosion (MIC). *Trends in Oil and Gas Corrosion Research and Technologies: Production and Transmission*, June, 191–214. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101105-8.00008-5>
- Tran, T. H., Govin, A., Guyonnet, R., Grosseau, P., Lors, C., Garcia-Diaz, E., Damidot, D.,

- Devès, O., & Ruot, B. (2012). Influence of the intrinsic characteristics of mortars on biofouling by *Klebsormidium flaccidum*. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 70, 31–39. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2011.10.017>
- Tsygankova, L. E., Vigdorovich, V. I., Uryadnikov, A. A., Vigdorowitsch, M. V., Shel, E. Y., & Uryadnikova, M. N. (2020). Protection of carbon steel with superhydrophobic coating against corrosion in NaCl solution. *Surface and Interface Analysis*, 52(12), 855–858. <https://doi.org/10.1002/sia.6825>
- Usher, K. M., Kaksonen, A. H., Cole, I., & Marney, D. (2014). Critical review: Microbially influenced corrosion of buried carbon steel pipes. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 93, 84–106. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2014.05.007>
- Varshney, P., Mohapatra, S. S., & Kumar, A. (2021). Durable and Regenerable Superhydrophobic Coating on Steel Surface for Corrosion Protection. *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*, 7(2), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s40735-021-00518-3>
- Vazirinasab, E., Jafari, R., & Momen, G. (2018). Application of superhydrophobic coatings as a corrosion barrier: A review. *Surface and Coatings Technology*, 341, 40–56. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.11.053>
- Videla, H. A., & Herrera, L. K. (2005). Microbiologically influenced corrosion: Looking to the future. *International Microbiology*, 8(3), 169–180. <https://doi.org/10.2436/im.v8i3.9523>
- Wang, D., Liu, J., Jia, R., Dou, W., Kumseranee, S., Punpruk, S., Li, X., & Gu, T. (2020). Distinguishing two different microbiologically influenced corrosion (MIC) mechanisms using an electron mediator and hydrogen evolution detection. *Corrosion Science*, 177(May), 108993. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108993>
- Wang, D., Ramadan, M., Kumseranee, S., Punpruk, S., & Gu, T. (2020). Mitigating

microbiologically influenced corrosion of an oilfield biofilm consortium on carbon steel in enriched hydrotest fluid using 2,2-dibromo-3-nitropropionamide (DBNPA) enhanced by a 14-mer peptide. *Journal of Materials Science and Technology*, 57, 146–152.

<https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.02.087>

Wang, L., Hu, C., & Shao, L. (2017). The-antimicrobial-activity-of-nanoparticles--present-situati. *International Journal of Nanomedicine*, 12, 1227–1249.

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5317269/pdf/ijn-12-1227.pdf>

Xu, D., Li, Y., & Gu, T. (2016). Mechanistic modeling of biocorrosion caused by biofilms of sulfate reducing bacteria and acid producing bacteria. *Bioelectrochemistry*, 110, 52–58.

<https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2016.03.003>

Xu, J., Sun, T. T., Jiang, S., Munroe, P., & Xie, Z. H. (2018). Antimicrobial and biocorrosion-resistant MoO₃-SiO₂ nanocomposite coating prepared by double cathode glow discharge technique. *Applied Surface Science*, 447, 500–511.

<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.04.026>

Yang, C., Dou, W., Pittman, C. C., Zhou, E., Xu, D., Li, H., Lekbach, Y., & Wang, F. (2020). Microbiologically influenced corrosion behavior of friction stir welded S32654 super austenitic stainless steel in the presence of *Acidithiobacillus caldus* SM-1 biofilm. *Materials Today Communications*, 25(February), 101491.

<https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101491>

Yin, K., Liu, H., & Cheng, Y. F. (2018). Microbiologically influenced corrosion of X52 pipeline steel in thin layers of solution containing sulfate-reducing bacteria trapped under disbonded coating. *Corrosion Science*, 145(December 2017), 271–282.

<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.10.012>

- Zhai, X., Ju, P., Guan, F., Ren, Y., Liu, X., Wang, N., Zhang, Y., Duan, J., Wang, C., & Hou, B. (2020). Electrodeposition of capsaicin-induced ZnO/Zn nanopillar films for marine antifouling and antimicrobial corrosion. *Surface and Coatings Technology*, 397, 125959. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125959>
- Zhai, X., Li, K., Guan, F., Sun, C., Duan, J., & Hou, B. (2018). Corrosion behavior of the chitosan-zinc composite films in sulfate-reducing bacteria. *Surface and Coatings Technology*, 344(2017), 259–268. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.03.032>
- Zhai, X., Ren, Y., Wang, N., Guan, F., Agievich, M., Duan, J., & Hou, B. (2019). Microbial corrosion resistance and antibacterial property of electrodeposited Zn-Ni-chitosan coatings. *Molecules*, 24(10), 1–12. <https://doi.org/10.3390/molecules24101974>
- Zhang, D., Wang, L., Qian, H., & Li, X. (2016). Superhydrophobic surfaces for corrosion protection: a review of recent progresses and future directions. *Journal of Coatings Technology and Research*, 13(1), 11–29. <https://doi.org/10.1007/s11998-015-9744-6>
- Zhang, Z. H., Wang, H. J., Liang, Y. H., Li, X. J., Ren, L. Q., Cui, Z. Q., & Luo, C. (2018). One-step fabrication of robust superhydrophobic and superoleophilic surfaces with self-cleaning and oil/water separation function. *Scientific Reports*, 8(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22241-9>
- Zhou, E., Wang, J., Moradi, M., Li, H., Xu, D., Lou, Y., Luo, J., Li, L., Wang, Y., Yang, Z., Wang, F., & Smith, J. A. (2020). Methanogenic archaea and sulfate reducing bacteria induce severe corrosion of steel pipelines after hydrostatic testing. *Journal of Materials Science and Technology*, 48, 72–83. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.01.055>
- Zhu, J., & Wu, J. (2020). One-step fabrication of an anti-corrosion superhydrophobic surface on stainless steel. *Materials Research Express*, 7(7). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aba218>

Apéndices

Apéndice A

Registro de los factores más influyentes en los artículos seleccionados para estudios MIC.

#	Microorganismo	Material	Composición y/o nutrientes del medio	Tipo de ambiente y pH	Temperatura y tiempo de incubación	Concentración Inicial y otros compuestos agregados
1	NRB (<i>Brevibacterium frigoritolerans</i>)	Acero para tuberías API 5L X80	<p>Nutrientes del medio de inoculación 5 g Peptona y 0.2 g KNO₃ en 1000 mL de agua desionizada, 2-3 gotas de solución A (0.8g C₆H₇NO₃S en 100mL de ácido acético de 2.5 mol/L) y solución B (0.5g de C₁₀H₉N en 100 mL de ácido acético de 2.5 mol/L) en 5 mL del medio de cultivo.</p> <p>Lixiviado del suelo artificial de Pekín</p> <p>- Nutrientes 10 g/L Sacarosa, 1 g/L Extracto de levadura, 13.9 g/L K₂HPO₃, 2.7 g/L KH₂PO₄, 1 g/L NaCl, 1 g/L NaNO₃ y 20 g/L agar</p> <p>- Cationes y aniones 0.0146 g/L KNO₃, 0.018 g/L Na₂CO₃, 0.0781 g/L CaCl₂, 0.399 g/L NaHCO₃, 0.333 g/L MgSO₄*7H₂O y 0.4 g/L Na₂SO₄</p> <p>- Microelementos 18 mg/L MnCl₂*4H₂O, 27 mg/L CoCl₂*6H₂O, 5 mg/L CuCl₂*2H₂O, 2.4 mg/L H₃BO₃, 2.3 mg/L NaMoO₄*2H₂O y 9 mg/L ZnCl₂</p>	Ambiente aeróbico a 30°C y pH 7.0 ajustado por medio de una solución diluida de ácido clorhídrico	Inoculación del caldo de cultivo a 36 ± 1°C por 24 y 72 horas	1.0*10 ⁷ células/mL
2	SRB y <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Aceros para oleoductos API 5L X80 con contenido de 1% y 2% de Cu	<p>Nutrientes del medio de cultivo API RP-38 para las SRB 0.2 g/L MgSO₄*7H₂O, 0.5 g/L KH₂PO₄, 10.0 g/L NaCl, 1 g/L ácido ascórbico, 4 g/L Lactato de sodio, 1 g/L Extracto de Levadura y 0.02 g/L Fe(NH₄)₂(SO₄)₂</p> <p>Nutrientes del medio de cultivo 2216E para las Pseudomonas aeruginosa 19.45 g/L NaCl, 5.98 g/L MgCl₂, 3.24 g/L Na₂SO₄, 1.8 g/L CaCl₂, 0.55 g/L KCl, 0.16 g/L Na₂CO₃, 0.08 g/L KBr, 0.034 g/L SrCl₂, 0.08 g/L SrBr₂,</p>	Ambiente anaeróbico, pH medio de cultivo API RP-38 7.1 ajustado con 1mol/L de NaOH y pH medio de cultivo 2216E 7.6 ± 0,2	Esterilización del medio de cultivo API RP-38 fue a 121°C por 20 minutos y la esterilización del medio de cultivo 2216E también a 121° por 20 minutos	50 mL de medio de cultivo en 450 mL de solución electrolítica NS4, la concentración inicial después de la inoculación es de 10 ⁶ células/mL) Solución Electrolítica NS4 0.122 g/L KCl, 0.483 g/L NaHCO ₃ , 0.181 g/L

#	Microorganismo	Material	Composición y/o nutrientes del medio	Tipo de ambiente y pH	Temperatura y tiempo de incubación	Concentración Inicial y otros compuestos agregados
			0.022 g/L H ₃ BO ₃ , 0.004 g/L NaSiO ₃ , 0.0024 g/L NaF, 0.0016 g/L NH ₄ NO ₃ , 0.008 g/L NaH ₂ PO ₄ , 5 g/L Peptona, 1 g/L Extracto de levadura y 1 g/L Citrato férrico			CaCl ₂ *2H ₂ O y 0.131 g/L MgSO ₄ *7H ₂ O
3	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Acero Inoxidable AISI 304L	Nutrientes del medio 2216E (Qingdao Hope Biotechnology Co. Ltd., Qingdao, China) 0.008 g/L NaH ₂ PO ₄ , 0.0016 g/L NH ₄ NO ₃ , 0.0024 g/L NaF, 0.004 g/L Na ₂ SiO ₃ , 0.022 g/L H ₃ BO ₃ , 0.08 g/L SrBr ₂ , 0.034 g/L SrCl ₂ , 0.08 g/L KBr, 0.16 g/L Na ₂ CO ₃ , 0.55 g/L KCl, 1.8 g/L CaCl ₂ , 3.24g/L Na ₂ SO ₄ , 5.98 g/L MgCl ₂ , 19.45 g/L NaCl, 0.1 g/L Citrato férrico, 1.0 g/L extracto de levadura y 5.0 g/L Peptona	Ambiente aeróbico a 37°C y no especifica el pH del medio	Incubación a 37°C por 24 horas	Concentración inicial del medio de cultivo 10 ⁶ células/mL
4	APB (<i>Acidithiobacillus caldus SM-1</i>)	Acero Inoxidable Super Austenítico (SASS) S32654 soldado por agitación por fricción (FSW)	Nutrientes del medio de cultivo liquido 0.5 g/L MgSO ₄ *7H ₂ O, 3 g/L (NH ₄) ₂ SO ₄ , 0.5 g/L K ₂ HPO ₄ *3H ₂ O, 0.1 g/L KCL y 0.01 g/L CaNO ₃	No especifica el ambiente, pero si la temperatura a 37°C, con pH de 2.5 ajustado con ácido sulfúrico al 10% (en peso)	Incubación a 37°C por 14 días	Concentración inicial de 105 células/mL Oligoelementos agregados 11 mg FeCl ₃ *6H ₂ O, 0.5 mg CuSO ₄ *5H ₂ O, 2.0 mg H ₃ BO ₄ , 2.0 mg MnSO ₄ *2H ₂ O, 0.8 mg Na ₂ MoO ₄ *2H ₂ O, 0.6 mg CoCl ₂ *6H ₂ O y 0.9 mg ZnSO ₄ *7H ₂ O disueltos en 10 mL de agua destilada
5	SRB (<i>Citrobacter sp.</i>)	Acero para tuberías micro aleado API 5L X70	Nutrientes del suelo 0.085 g/L NaCl, 0.017 g/L NaHCO ₃ , 0.033 g/L KCl, 0.064 g/L MgSO ₄ *7H ₂ O y 0.2 g/L CaSO ₄ *2H ₂ O Nutrientes del medio de cultivo 1 g/L Extracto de levadura, 1 g/L Cloruro de amonio, 1 g/L Cloruro de sodio, 1 g/L Sulfato de calcio di-hidratado, 2 g/L Sulfato de magnesio hepta-hidratado, 5 g/L Citrato de sodio y 0.5 g/L Ortofosfato de hidrógeno di-potasio	Ambiente simulado en una cámara Anaeróbica (Espacio de cabeza de nitrógeno sin oxígeno) y un pH del suelo de 7.2	Incubación a 37°C por 7 días	La concentración inicial 6 mL suspensión bacteriana en 114 mL medio de simulación del suelo. Se añadió al medio de cultivo un filtro esterilizado (0,45 µm) de sulfato amónico ferroso al 5%

Apéndice B

Registro de los métodos de prevención y protección más influyentes de los artículos seleccionados para estudios MIC.

Referencia	Material	Microorganismos involucrados	Método de prevención y/o protección	Compuesto activo	Resultados y conclusiones
(Lekbach et al., 2018)	Acero inoxidable 304L Cupones (Diámetro 1cm)	- <i>Pseudomonas aeruginosa</i> *	Inhibidor ecológico	Extracto etanólico de <i>Cistus ladanifer</i>	Los autores de este estudio lograron crear un inhibidor a partir del extracto de la planta <i>C. ladanifer</i> el cual redujo la tasa de biocorrosión en aproximadamente 99,36% (considerando los valores de la prueba LPR). Pruebas de mojabilidad muestran una tendencia a volverse una superficie hidrofílica (WCA de 29,43°) al agregarse el inhibidor, además de volverse más electro donante ($\gamma = -39.47 \pm 0.64$ mJ/m ²). Los valores exhibidos ante pruebas de OCP mostraron mantener el potencial por encima de 180mV después de 14 días de prueba, lo que indica una alta protección y una durabilidad del efecto en el metal tratado, adicionalmente los ensayos EIS mostraron tener unos valores de impedancia más altos y por ende una curva con mayor diámetro en la gráfica de Nyquist. De igual forma se realizaron pruebas para la medición de las picaduras mostrando que al usar este inhibidor la reducción de las picaduras fue total, pues el cupón en el medio biótico no inhibido tenía picaduras de 15.1 ± 3.26 μm en promedio. De forma global, la acción de inhibición de la MIC del extracto de <i>C. ladanifer</i> se debió a la adsorción de sus compuestos en las superficies del acero inoxidable 304L y a la formación de una película protectora orgánica que modificó las propiedades fisicoquímicas de este material.
(Parthipan et al., 2018)	Acero al carbono API 5LX Cupones (25mm * 25mm * 0.4mm y 10mm * 10mm * 1mm)	Cepa bacteriana*: - <i>Bacillus subtilis</i> - <i>Streptomyces parvus</i> - <i>Pseudomonas stutzeri</i> - <i>Acinetobacter baumannii</i>	Inhibidor microbiano ecológico	Biosurfactante BS de tipo glicolípido (Ramnolípido)	El presente estudio logró encontrar una menor tasa de corrosión del acero al carbono al estudiar el biosurfactante Glicolípido natural (Ramnolípido) que generan las bacterias <i>Pseudomonas mosselii</i> como inhibidor/biocida en presencia de consorcios mixtos de bacterias, mostrando una eficiencia de inhibición de corrosión (IE%) entre un 80% y 87% en presencia de las moléculas de biosurfactante para sistemas abióticos así como en los consorcios mixtos, de igual forma el I_{corr} bajo en presencia de las moléculas de biosurfactantes confirma el efecto inhibidor del compuesto y mostró que en condiciones hipersalinas actúa incluso como agente anti-biofilm. Todo esto mostrando que es una gran opción ambientalmente sostenible para usarse en metales bajo condiciones hipersalinas.

Referencia	Material	Microorganismos involucrados	Método de prevención y/o protección	Compuesto activo	Resultados y conclusiones
(Lekbach, Dong, et al., 2019)	Acero inoxidable 304L Cupones rectangulares (1cm ² superficie expuesta)	- <i>Pseudomonas aeruginosa</i> *	Inhibidor ecológico	Hidrato de catequina CH obtenido de la planta <i>Cistur ladanifer</i>	Con este estudio los autores logran investigar más a detalle una molécula (CH) derivada de los flavonoides de esta planta, demostrando tener altas capacidades de inhibición en la formación de la biopelícula, así como de la inhibición de la corrosión en la superficie del acero. Los datos obtenidos de diferentes ensayos electroquímicos demostraron que el CH inhibía la corrosión inducida por bacterias <i>P. aeruginosa</i> con una excelente eficacia de inhibición del 99,8% gracias a la acción del grupo hidroxilo que tiene un comportamiento antimicrobiano, de igual forma, mostraron que el mecanismo antibacteriano de la molécula era dañar las membranas celulares, por tanto, provocar la fuga de los componentes celulares en cuestión de 120 minutos. Adicionalmente, la molécula genera la adhesión de en la superficie del metal por medio de reacciones de dono-aceptación de electrones y uniéndose con los sitios de reacción anódica polarizadas positivamente logrando cambiar fisicoquímicamente las propiedades de la superficie. Y finalmente los ensayos invitro demostraron la molécula no es toxica para células <i>MC3T3-E1</i> .
(Lekbach, Li, et al., 2019)	Acero inoxidable 304L Cupones (1cm ² superficie expuesta)	- <i>Pseudomonas aeruginosa</i> *	Inhibidor ecológico	Extracto de <i>Salvia officinalis</i>	El presente estudio se realizó con el propósito de evaluar el comportamiento, efectividad de la inhibición y capacidad antimicrobiana del extracto de la <i>S. Officinalis</i> , mostrando un (EI%) de 97,5 ± 1,5%, los cupones incubados en el medio inhibido mostraron una ausencia de picaduras en la superficie. Este hallazgo confirmó la excelente protección contra la corrosión del extracto de la planta al prevenir la formación de biofilm y desintegrar la arquitectura al matar las bacterias sésiles que se llegan a depositar en la superficie, logrando esto casi por completo en un periodo de 120min. Con el objetivo de confirmar los hechos, se realizaron estudios electroquímicos (EIS, OCP, LPR) donde se logró mostrar un $I_{corr} 0.06 \pm 0.02 (\mu Acm^{-2})$ y $E_{cor} 0.14 \pm 0.01(V)$ y las curvas de Nyquist indicaron valores de un semicírculo con impedancia mayor en el estado inhibido. En general, el extracto de <i>S. officinalis</i> poseen excelentes propiedades biocidas y de inhibición de la corrosión del acero inoxidable tipo 304L contra la biopelícula corrosiva de bacterias <i>P. aeruginosa</i> .
(Packiavathy et al., 2019)	Acero inoxidable 316L Cupones (5cm * 2.5cm)	- <i>Escherichia coli</i> y otras especies bacterianas*	Inhibidor eco-amigable QS (sistema de detección de quórum)	Fitoquímicos dietéticos (Metil eugenol) del <i>Cuminum cyminum</i> (<i>Comino</i>)	Los autores del presente estudio investigativo emplearon un inhibidor a base de Metil eugenol derivado de la planta <i>Cuminum cyminum</i> , el cual tiene un efecto disruptivo en el QS de la biopelícula. Por medio de estudios electroquímicos (EIS, OCP, CPR) y microscopías (EFM, SEM, CLSM) se comprobó que el exopolisacárido (EPS) y la proteína extraída de la biopelícula

Referencia	Material	Microorganismos involucrados	Método de prevención y/o protección	Compuesto activo	Resultados y conclusiones
					<p>formada en la superficie del metal se redujeron en un 64% y 60% respectivamente al emplear Metil eugenol (100mg/L) en el agua. Los datos de EIS también sugirieron una mayor resistencia del acero inoxidable 316L a la biocorrosión en presencia de este compuesto, pues los valores de impedancia fueron más elevados. Estos experimentos indican que el Metil eugenol podría abordar el problema planteado por la biocorrosión y proporcionan una nueva visión de la aplicación de los inhibidores de QS para controlar la biocorrosión, sin embargo, es recomendable seguir estudiando el tema para mejorar la efectividad de inhibición antes de proceder a estudios más avanzados en el área.</p>
(Pakiet et al., 2019)	<p>Acero dulce pre-fosfatado (0.10% C, 0.60% Mn, 0.03% P, 0.035% S, 0.2% Cu, 0.2% Ni y 0.15% Cr) Cupones</p>	<p>- SRB: <i>Desulfovibrio salexigens</i>^o</p>	<p>Inhibidores multifuncionales</p>	<p>Surfactante o tensoactivos Gemínicos (bromuro de Hexametileno 12-6-12)</p>	<p>Este estudio investigó la inhibición de la corrosión y la biocorrosión del acero al carbono utilizando surfactante gemínicos como lo es el bromuro de hexametileno (12-6-12). Las curvas de polarización catódica y anódica (soluciones que contenían 3.5% NaCl) disminuyeron en presencia de los tensoactivos (2 mM de 12-6-12), donde la densidad de corriente paso de 119,69 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ a 0,84 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, lo cual indica que estos compuestos suprimen ambas reacciones electroquímicas en la superficie del acero dulce. En resumen, estos resultados indicaron que el 12-6-12 funciona como inhibidor mixto contra la corrosión, esto también fue comprobado por los resultados obtenidos por los ensayos EIS que demostraron la presencia de una capa protectora interfacial entre el electrolito y el sustrato metálico. Además, por medio de ensayos EIS y LPR se observa que incluso a la mínima concentración del inhibidor (0.018mM) se logra mitigar considerablemente las SRB (95%), lo que a su vez indicaba una eficiencia ante la biocorrosión; sin embargo, aunque los tensoactivos gemínicos en este estudio demostraron ser eficaces ante la corrosión y la biocorrosión; pero, los autores mencionaron que aún falta información electroquímica para establecer este compuesto activo como posible alternativa para la mitigación de la MIC.</p>
(Ituen et al., 2020)	<p>Acero API 5L X80 Cupones (3cm * 3cm * 0.5cm y 1cm * 1cm * 0.5cm)</p>	<p>Cepa de SRB^o: -<i>Desulfovibrio autotrophicum</i>, -<i>Desulfovibrio postgatei</i> -<i>Desulfovibrio desulfuricans</i></p>	<p>Inhibidor ecológico</p>	<p>Extracto de cáscaras de <i>Citrus reticulata</i> (Mandarina) para mediar la síntesis de nanopartículas de cobre ETP-CuNPs</p>	<p>Con el presente estudio los autores logran sintetizar nanopartículas de cobre a partir de extracto de cáscaras de <i>C. Reticulata</i> ETP-CuNPs con la finalidad de aplicarlo en un acero X80, para así poder medir la efectividad de este inhibidor ecológico ante la corrosión ácida (solución de 1M HCl) y la biocorrosión (cepa de SRB), para ello se realizaron pruebas en diferentes concentraciones (0.1 g/L y 1.0 g/L). Las imágenes obtenidas por los ensayos SEM y TEM da como resultado que la morfología de las CuNPs es casi esférica ($d \approx 54 \text{ nm}$ y 72 nm),</p>

<i>Referencia</i>	<i>Material</i>	<i>Microorganismos involucrados</i>	<i>Método de prevención y/o protección</i>	<i>Compuesto activo</i>	<i>Resultados y conclusiones</i>
					<p>también con este mismo tipo de ensayos se determinó que la superficie del metal en presencia del inhibidor era mucho más lisa y con una considerable reducción de las picaduras. Se realizaron ensayos OCP donde se determinaron los valores de I_{corr} y a partir de ellos se calculó la eficiencia de inhibición ante la corrosión ácida (95.3%, 94.6%, 92.7% y 89.8% a 303K, 313K, 323K y 333 K, respectivamente) y la biocorrosión (86.2%, 84%, 76% y 73.8% a 303K, 313K, 323K y 333 K, respectivamente); además, estos resultados fueron comparados con los que se obtuvieron en los ensayos de EIS. En resumen, los autores demostraron la existencia de una nueva alternativa para inhibir simultáneamente la corrosión ácida y la MIC, principalmente si se tiene en cuenta el aumento de la temperatura del ambiente donde encuentre expuesto el metal a proteger.</p>
(Ouyang et al., 2020)	<p>Acero Inoxidable 304 Electrodo de trabajo (1cm² superficie expuesta)</p>	<p>- SRB (Medio anaeróbico)</p>	<p>Inhibidor superhidrofóbico (Método de tres pasos: Electrodeposición, deposición de vapor e infusión de aceite)</p>	<p>Superficie con infusión de lubricante LIS Co(OH)₂</p>	<p>Los autores de este estudio lograron preparar una superficie con infusión de lubricante LIS mediante un método de tres pasos que tuvo la capacidad de inhibición de la bio-adhesión de las SRB, lo que a su vez mitigó los efectos causados por la MIC en aceros inoxidables SS. Los ensayos de microscopía óptica y SEM dieron como resultado que la morfología final del depósito forma una estructura de pared rugosa y porosa (relación de porosidad 54.1%) la cual es mucho menor que la del SS al desnudo; además, la técnica EDX confirmaron la formación de Co(OH)₂ durante el proceso de electrodeposición, lo cual potenció las propiedades hidrofílicas de la LIS hasta alcanzar la superhidrofobicidad (>150°). Tras obtener esta propiedad, la LIS también desarrolló un ennoblecimiento reduciendo así la susceptibilidad de la corrosión para el acero subyacente, esto último se demostró por la técnica SKP (E_{corr}= 480mV). Para el análisis de la efectividad de inhibición contra la MIC, los autores obtuvieron que tras 6 días de suspensión en un medio con SRB, la LIS disminuyó notablemente la densidad de adhesión de las bacterias (1.43×10^8 células/cm²) en comparación con el SS al desnudo (7.06×10^9 células/cm²) alcanzando una %EI= 97.97% aproximadamente. Otra técnica utilizada para demostrar la efectividad de inhibición de la biocorrosión fueron las curvas de Tafel, donde se ilustró que la LIS presentó la menor intensidad de corriente (1.79×10^{-6} A/cm²) en comparación con el acero inoxidable al desnudo (6.54×10^{-4} A/cm²), esto tras 10 días de inmersión en el medio con presencia de SRB; además, el potencial de corrosión se mantiene relativamente similar (de -0.14V a -0.15V) lo que indica alta estabilidad por parte del inhibidor. En conclusión, la LIS muestra</p>

Referencia	Material	Microorganismos involucrados	Método de prevención y/o protección	Compuesto activo	Resultados y conclusiones
					ser una buena alternativa de inhibición ante la bio-adhesión y la biocorrosión para la protección de los aceros inoxidables incluso en entornos marinos.
(Cheng et al., 2021)	Acero EH40 (acero de bajo carbono) Cupones (10mm * 10mm * 1mm)	- <i>Pseudomonas aeruginosa</i> *	Inhibidor ecológico (Anodización en un solo paso en solución de NaOH)	Película funcional nanoestructurada (Componentes principales son α -Fe ₂ O ₃ y Fe ₃ O ₄)	Por medio del presente estudio los autores lograron crear una película funcional pasivada de carácter inhibitorio mediante un proceso de anodizado en una solución con NaOH arrojando como compuestos principales óxidos de hierro (α -Fe ₂ O ₃ y Fe ₃ O ₄) donde los resultados mostraron que las películas inhiben la adhesión de <i>P. aeruginosa</i> y su rendimiento antiadherente aumenta o disminuye en función de la concentración de NaOH en la solución del proceso. Después de varios estudios electroquímicos lograron establecer que la mejor funcionalidad de la capa pasiva se logra al emplear un potencial de anodizado de 1,0V en una concentración de 12M de NaOH durante 2 h. La presencia de α -Fe ₂ O ₃ mostró ser fotocatalítico, pues genera radicales hidroxilos (OH ⁻) como indicaban estudios previos de otros autores, ahora, dicho radical logró desactivar las células bacterianas en mayor proporción, lo que resultó en una mejora del rendimiento antiadherente bacteriano de la película del 99,9%; el rendimiento óptimo de antiadherencia en condiciones de oscuridad es 92,7% en comparación con el acero desnudo.
(Parthipan et al., 2021)	Acero al carbono API 5LX Cupones (2.5cm * 2.5cm * 0.4cm y 1cm * 1cm * 0.2cm)	Cepa bacteriana*: - <i>Bacillus subtilis</i> - <i>Pseudomonas stutzeri</i> - <i>Acinetobacter baumannii</i> - <i>Streptomyces parvus</i>	Inhibidor ecológico	Extracto acuoso de <i>Glycyrrhiza glabra</i> GG	Con el presente estudio los autores evaluaron la eficacia de la inhibición del extracto de GG en un acero al carbono grado 5L X, donde se encontraron valores de (EI%) del 92% y 99,8% para el sistema de consorcios mixtos añadidos con 600 ppm de inhibidor. Con diferentes estudios electroquímicos (LPR, EIS, OCP) se observó que la adición de moléculas inhibitoras suprime los problemas de corrosión formando una capa protectora sobre las superficies de acero; además el inhibidor GG actuó en parte como biocida suprimiendo el crecimiento bacteriano. Este inhibidor también es capaz de proteger el acero al carbono de la corrosión por picadura causada por especies corrosivas (Cl ⁻ y Na ⁺) al formar una capa barrera sobre la superficie del metal, por lo que se puede decir que el inhibidor fue adsorbido sobre la capa del material impidiendo la interacción directa con el medio. Por último, los estudios de pérdida de peso revelaron que el extracto acuoso de GG es una excelente opción de protección contra la corrosión al reducir significativamente la pérdida de peso (de 189 ± 6 a 15 ± 2 mg/cm ²) y la velocidad de corrosión (de 0.703 ± 0.022 a 0.0484 ± 0.007 mm/y).

Referencia	Material	Microorganismos involucrados	Método de prevención y/o protección	Compuesto activo	Resultados y conclusiones
(Eduok et al., 2018)	Acero galvanizado en caliente HDG Cupones (2.5cm * 2.5cm Superficie expuesta)	- SRB <i>Desulfovibrio caledoniensis</i> ^o	Biocida	Benzotiazol bicíclico MBT	Este estudio se desarrolló la adición de un biocida convencional como el Benzotiazol bicíclico MBT lograba la obtención de propiedades antibacterianas a la capa de Zn presente en el acero, mostrando una eficiencia de inhibición en presencia de SRB hasta de un 80% en concentraciones de 100 ppm, esto se logró debido a que los biocidas orgánicos son absorbidos por las membranas celulares y va entrando en contacto con el contenido citoplasmáticos de las bacterias, lo que a su vez va generando una fragilidad osmótica, lo último promueve gradualmente la muerte de estos microbios. En general, la interacción biocida-metal para proteger un acero ante la corrosión microbiana fue eficaz y se comprobaría por medio de los resultados de ensayos FTIR y EIS, donde el primero demostraba que el biocida es absorbido por el metal mientras que el segundo por medio de gráficas ilustraba la mejora de la protección ante la MIC.
(Deepa et al., 2019)	Acero dulce galvanizado en caliente HDG Cupones (3.5cm * 2.5cm * 0.1cm)	Cepa bacteriana: - <i>Escherichia coli</i> - Bacterias mixtas de agua de mar	Biocida incorporado por el método de hidrólisis térmica	Compuesto de TiO ₂ incorporado con molibdeno Mo-TiO ₂ en un recubrimiento de zinc (hot-dip)	Los autores lograron desarrollar un composite de óxido de titanio incorporado con Molibdeno (Mo-TiO ₂) como modificador químico a la capa de zinc presente en un acero dulce galvanizado en caliente HDG . Ejecutaron pruebas bajo diferentes concentraciones moleculares de composite, los resultados de EIS mostraron que aquel que presentaba mayor resistencia de carga ($R_{ct}=76,24 \Omega\text{cm}^2$) fue el MTO-1 (Mo:Ti=0.1:1) al 0.2% en el recubrimiento de zinc por inmersión en caliente, los estudios de polarización expusieron que esta misma composición de composite presentó notablemente el mayor potencial de corrosión (-1125 mV) y un bajo I_{corr} (54,46 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$), lo cual confirma que es aquel que presenta la menor probabilidad de corrosión, alta estabilidad electroquímica y alta protección de barrera como recubrimiento; además, la incorporación efectiva de esta composición de composite fue comprobado a partir del espectro EDAX. La eficiencia antibacteriana del recubrimiento modificado se analizó mediante un ensayo de turbidez, donde el revestimiento con 0.2% de MTO-1 presentó un eficaz efecto biocida mitigando la presencia de microorganismos (70.57% <i>E. coli</i> y 65.05% bacterias mixtas) en la superficie del metal, dicha propiedad se atribuía a la abundante presencia de protuberancias puntiagudas en su morfología, las cuales reducían la adhesión de las bacterias y a su vez mitigaban la formación de biofilm en la superficie del metal; además, la inhibición también se dio por la fácil generación de ROS de este recubrimiento modificado. Por lo tanto, el recubrimiento de zinc por inmersión en caliente incorporado con el composite MTO-1 ha demostrado ser un recubrimiento eficaz

Referencia	Material	Microorganismos involucrados	Método de prevención y/o protección	Compuesto activo	Resultados y conclusiones
					con propiedades biocidas y mitigación de la corrosión; sin embargo, es necesario más estudios antes de convertirse en una alternativa para evitar el uso de recubrimiento químicos y otros métodos convencionales tóxicos al medio ambiente.
(Rasheed, Jabbar, Rasool, et al., 2019)	Acero al carbono S150 Barras (Diámetro 8mm y altura 10mm)	- SRB* en el Medium ATCC 1249 (Medio de Baar modificado)	Biocida ecológico	Nanocompuesto de quitosano interconectado con 10% de ZnO (CZNC-10)	El presente estudio logra confirmar la capacidad y eficiencia inhibitoria para la formación del biofilm bacteriano de las SRB que posee dicho nanocompuesto con una concentración de 250 µg/mL de CZNC-10 en el acero al carbono, indicando que el CZNC-10 redujo significativamente la biocorrosión mediante la inhibición del crecimiento bacteriano y la formación de una película que ofrece mayor protección en la superficie del acero evitando el ataque bacteriano durante los primeros días de incubación. El estudio EIS mostró valores más altos de la resistencia de la doble capa (R_{ct}) formada después de 21 y 28 días de incubación en presencia de CZNC-10 alcanzando casi un 3,2 y 2,8 veces más que el control respectivamente, lo que indica una fuerte inhibición de la corrosión, adicionalmente, la eficiencia de la inhibición de la corrosión (IE%) logró valores de 73,4% - 61,3% para el muestreo realizado entre los 4 y 28 días. De forma general, el estudio reveló que el CZNC-10 puede ser utilizado como un sistema eficaz de inhibición de la corrosión biológica producida por las SRB para la mitigación de la MIC.
(D. Wang, Ramadan, et al., 2020)	Acero al carbono C1018 Cupones (1.2cm * 1cm)	Cepa bacteriana: - SRB <i>Desulfovibrio vulgaris</i> - Arqueas reductoras de sulfato (SRA) - Bacterias productoras de ácido (APB) - Metanógenos - Bacterias heterótrofas	Biocida ecológico	2,2- dibromo-3-nitropropionamida DBNPA mejorado con Péptido A (Agente de dispersión de biopelículas)	Los autores del presente estudio hallaron la forma de emplear un péptido A modificado que en bajas concentraciones actúa como potenciador del efecto inhibitorio del DBNPA . Dicho agente no tiene gran impacto al ser empleado de manera independiente, pues al emplearlo en un consorcio bacteriano este mantuvo su comportamiento recalcitrante como explican los autores. Sin embargo, con la combinación de 100 ppm de DBNPA + 100 nM de péptido A, se produjeron reducciones adicionales de 0,9-log, 0,8-log y 0,6-log respectivamente en comparación con el tratamiento de solo 100 ppm de DBNPA en cuanto a las bacterias empleadas en el estudio (SRB, APB, GHB). Las reducciones adicionales del recuento de células sésiles demostraron el efecto potenciador del péptido A para 100 ppm de DBNPA en la prevención del establecimiento de la biopelícula en el acero al carbono, pues cuando se empleó dicho agente se logró matar mayor cantidad de células sésiles quedando menos biomasa de biofilm en la superficie del cupón. Las pruebas electroquímicas empleadas en este estudio (LPR, PDP) mostraron comportamientos buenos al emplear el inhibidor combinado con el

Referencia	Material	Microorganismos involucrados	Método de prevención y/o protección	Compuesto activo	Resultados y conclusiones
					<p>potenciador, pero al realizar la prueba OCP esta mostró un comportamiento desfavorable por la complejidad del consorcio, posteriormente se logró corroborar con estudios de otros autores que el comportamiento cinético de las bacterias afecta en gran parte dicha funcionalidad del ensayo, dejando por descartados los resultados que se pueden obtener con esta metodología al ser poco fiables.</p>
(Shi et al., 2018)	<p>Acero API 5L X80 Bloques (70mm * 70mm * 80mm)</p>	<p>2 cepas de bacterias: - SRB (Medio API RP-38) - <i>Pseudomonas aeruginosa</i></p>	<p>Material modificado</p>	<p>Modificación de la aleación (acero grado API 5L X80 con 1% y 2% de Cu respectivamente.)</p>	<p>Por medio del presente estudio se logró crear un acero de grado API 5L X80 modificado con 1%Cu el cual inicialmente no alcanzaba las propiedades mecánicas del grado del acero, que posteriormente con un proceso de envejecimiento superó ligeramente al X80 puro, ganando esto de su procesos de endurecimiento por precipitado de nanopartículas enriquecidas de Cu; en cuanto a las propiedades de antimicrobianas para control de MIC logró demostrar tener una menor tasa de corrosión en presencia de SRB , además de disminuir el grosor de la biopelícula formada por <i>P. aeruginosa</i> logrando llegar a matar una gran cantidad de bacterias después de 3 días en incubación y no menos importante logró demostrar que la resistencias a corrosión por picadura es significativamente mayor al acero no modificado. Lo anterior mencionado se les atribuye a múltiples mecanismos de acción antibacteriana del Cu, particularmente las presencias de iones de este metal, también a la interrupción de procesos catalíticos naturales de bacterias en presencia de Cu⁺ y Cu²⁺, o incluso llegando a interrumpir procesos de síntesis proteicas al depositarse estos iones en las cadenas de ADN impidiendo la replicación adecuada de sus genes.</p>
(W. Cai et al., 2018)	<p>Acero dulce (bajo carbono) Placas (3.0cm * 8.0cm)</p>	<p>Cepa bacteriana*: - <i>Escherichia coli</i> - <i>Bacillus subtilis</i></p>	<p>Recubrimiento epóxico modificado, sintetizado químicamente (Polimerización química oxidativa)</p>	<p>- Polianilina PANI - Polianilina bromo-sustituida deducida Br-PANI</p>	<p>Este estudio encontró que los recubrimientos EBP tienen mejores propiedades anticorrosivas que los recubrimientos epóxicos puros y los recubrimientos con PANI, se comprobaron con estudios de impedancia electroquímica (EIS), esto sucede al aumentar la cantidad de Bromo en los recubrimientos con Br-PANI (EBP), debido a que este tipo de recubrimiento permite la formación de una capa especial de óxido pasivado (Fe₂O₃/Fe₃O₄) durante el proceso de corrosión permite que siga teniendo un buen rendimiento anticorrosivo aun cuando el recubrimiento está dañado. No menos importante la efectividad antimicrobiana es de hasta 97,2% con un 2% de Br-PANI en el compuesto epóxico y a su vez previene la formación de biocapas. En general, el Br-PANI puede utilizarse como aditivo de recubrimiento para proteger</p>

Referencia	Material	Microorganismos involucrados	Método de prevención y/o protección	Compuesto activo	Resultados y conclusiones
					acero u otros tipos de materiales de la corrosión electroquímica y la bioincrustación.
(J. Xu et al., 2018)	Acero inoxidable 316L Cupones (10mm * 10mm * 2mm)	2 cepas bacterianas: - <i>Escherichia coli</i> * - <i>Staphylococcus aureus</i> * - SRB°	Recubrimiento nanocompuesto (Deposición reactiva por pulverización catódica con el método de plasma de descarga brillante de doble cátodo)	Nanocompuesto de MoO ₃ -SiO ₂	Por medio de este estudio se desarrolló un recubrimiento nanocompuesto de MoO ₃ -SiO ₂ novel; se encontró que, en condiciones anaeróbicas, el recubrimiento puede inhibir eficazmente el crecimiento de SRB, a través de la formación de los complejos Mo(V)-S sobre su superficie, teniendo un gran potencial para aplicaciones antibacterianas en entornos agresivos. Entre sus capacidades, la hidrofobicidad de este recubrimiento logra alcanzar un ángulo de contacto de 114,2° y la efectividad de inhibición bacteriana alcanzó valores del 80,7% y el 68,9% para <i>E. coli</i> y <i>S. aureus</i> , respectivamente con este logrando demostrar que el recubrimiento es capaz proporcionar una protección eficaz de componentes metálicos industriales ante la MIC en un entorno marino complejo.
(Zhai et al., 2018)	Acero al carbono (0.19% C, 0.31% Si, 0.55% Mn, 0.04% P, 0.043% S) Cupones (50mm * 13mm * 2mm)	- SRB: <i>Desulfovibrio caledoniensis</i> °	Película por electrodeposición	Quitosano-Zinc	El presente estudio muestra como los autores logran electro depositar unas películas compuestas de Quitosano y Zinc en diferentes concentraciones (0,2 - 0,6 - 1,0 g/L) y mostraron que la morfología de la superficie puede alterarse con las diferentes concentraciones de quitosano en el electrolito, obteniendo así un efecto de inhibición evidente sobre el crecimiento de las bacterias. En cuanto a el metabolismo de las SRB, mostró una capacidad de ralentizar considerablemente el proceso corrosivo de estas. El efecto inhibitorio de esta película permitió prever la adhesión de las bacterias. Entre todas las películas de quitosano-zinc, la CCS2 obtenida a partir del electrolito con adición de 0,6 g L ⁻¹ de quitosano reveló un intenso efecto de inhibición (90% de las SRB no se adhirieron) y se logró bajar la tasa de corrosión a 0.39 mm/y, el CCS2 mostró también ser el mejor de los recubrimientos ensayados pues los productos de corrosión formados fueron pocos en comparación con los demás, esto fue comprobado con diferentes pruebas electroquímicas y de espectroscopía. Es necesario aclarar que el compuesto de quitosano no modificó la reacción catódica y anódica del proceso de corrosión de las películas de zinc (liberación de Zn ²⁺), pero mejoró la resistencia a la corrosión al reducir la capacidad corrosiva del medio SRB, inhibir la adhesión bacteriana y aumentar la conductividad eléctrica de las películas hasta cierto punto.
(Fayyad et al., 2019)	Acero al carbono API 5L X100	- <i>Escherichia coli</i> *	Recubrimientos nanocompuestos NCC	Nanopartículas de TiNi en la matriz de NiP (recubrimientos de níquel-	Con el presente estudio los autores crearon y estudiaron las propiedades anticorrosivas, antibacterianas y dureza de un recubrimiento nanocompuesto de TiNi en una matriz de NiP

Referencia	Material	Microorganismos involucrados	Método de prevención y/o protección	Compuesto activo	Resultados y conclusiones
	Cupones (20mm * 15mm * 5mm)			fósforo depositados en forma de electrólisis)	(matriz que se deposita auto catalíticamente) sin necesidad de un procesos de electrólisis con electrodos en el baño; para ello se emplearon diferentes concentraciones de TiNi (0,2-0,4-0,8g/L) en donde mediante diferentes pruebas electroquímicas, microscopía y espectroscopía llegaron a comprobar que una concentración óptima para la adición de TiNi es de 0,4 g/L, pues ofrece al recubrimiento nancompuesto la mayor protección contra la corrosión (alcanzando aproximadamente el 98% de protección ante medios en presencia de NaCl), así mismo La viabilidad celular de las <i>Escherichia coli</i> disminuye del 100% a un 30% aproximadamente con esta concentración debido a la gran presencia de compuestos de Ni capaces de liberar Ni ²⁺ el cual tiene un efecto bastante perjudicial pues desnaturaliza el estado de las bacterias conduciendo a la muerte progresiva o la mutación de los microorganismos. Aunque no se realizaron estudios concretos de la hidrofobicidad del material, debido a la composición del recubrimiento es de esperarse que esta propiedad mejore impidiendo así el anclaje de las bacterias en la superficie del metal. En general, los NCC de NiP-TiNi son muy recomendables para ser empleados como recubrimiento resistente al desgaste, antibacteriano y anticorrosivo para el acero al carbono.
(González et al., 2019)	Aluminio 2024-T3. Electrodo de trabajo (1cm ² Superficie expuesta)	- <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Recubrimiento Sol-gel (La síntesis de las nanopartículas de plata se realizó por el método modificado de Wang)	Polímeros híbridos de tipo silanol, modificados con nanopartículas de plata AgNPs encapsuladas con Tetraetoxisilano TEOS (>99%)	Los autores de este estudio lograron confirmar la capacidad de inhibición de la corrosión y la biocorrosión de polímeros híbridos de tipo silanol modificados, los cuales contenían nanopartículas de plata AgNPs encapsuladas con la sílice Tetraetoxisilano TEOS (>99%) para la protección de la aleación de aluminio 2024-T3. Por medio de los ensayos de DLS y TEM se encontraron que las AgNPs tienen una morfología esférica (d= 20nm) independientemente de lo añadido de TEOS; sin embargo, su diámetro aumentaría proporcionalmente (d= 24nm a 30nm). Mediante el uso del software ImageJ se obtuvieron resultados que indican que los recubrimientos con AgNPs encapsuladas tendrían un aumento de las propiedades hidrofóbicas, la cual evitaría la adhesión de bacterias; esto último es comprobado al analizar las imágenes del ensayo SEM donde el revestimiento Hy/AgNPs3 (100 μm TEOS) se encontraba libre de la formación de biofilms. Las pruebas EIS revelaron que los recubrimientos con AgNPs encapsuladas tienen un efecto protector ante la corrosión y la biocorrosión, esto también se demostró durante las pruebas OCP donde se observaron características de barrera en el revestimiento. En general, este tipo de recubrimientos (principalmente el Hy/AgNPs3) son viables alternativas como protección ante la

Referencia	Material	Microorganismos involucrados	Método de prevención y/o protección	Compuesto activo	Resultados y conclusiones
					<p>corrosión y la biocorrosión en aleaciones de aluminio, ya que los estudios demostraron que son efectivos para mitigar la penetración del electrolito analizado (solución de 0.1 M NaCl) hacia la superficie metálica como también de las bacterias <i>P. aeruginosa</i> tras 7 días de exposición.</p>
(López-Ortega et al., 2019)	<p>Placas de acero de grado R4 Cupones (50mm * 75mm * 8mm)</p>	<p>- <i>Escherichia coli</i></p>	<p>Recubrimiento dúplex superhidrofóbico</p>	<p>Pulverización térmica por arco con una capa de aluminio TSA + Oxidación electrolítica por plasma PEO y Pintura epóxica (Carboguard® 890 + nanopartículas de SiO₂ y un agente biocida Cu₂O)</p>	<p>Los autores de este estudio lograron crear un recubrimiento epóxico funcional compuesto (Carboguard® 890 + 25% de peso de SiO₂ y 1,5% de Cu₂O) sobre un sustrato metálico modificado superficialmente (Acero al carbono R4 +Aluminio TSA/PEO) presentando características superhidrofóbicas (ángulos de contacto superiores a 150°), anti-incrustantes (reducción de las bacterias <i>E. coli</i> en un 64,53%.) y biocida (eliminación de bacterias adheridas de un 99.99%), con alta adherencia mayores al 5MPa según lo recomendado en el estándar ISO 12944-9 incluso después de exposición a variedad de ambientes simulados (niebla salada, agua condensada, inmersión en agua salada y combinados), baja toxicidad ofreciendo una posibilidad de reducir los valores de intoxicación marina causada por otros tipos de recubrimientos convencionales, además de un rendimiento adecuado en las pruebas de envejecimiento a la intemperie. No obstante, determinaron que se necesita realizar más investigaciones para validar funcionalidad de la pintura como pintura antiincrustante, estudiando la inhibición del crecimiento bacteriano contra otra amplia gama de bacterias presentes en el entorno marino.</p>
(Zhai et al., 2019)	<p>Acero al carbono Q235 Cupones (50mm * 13mm * 2mm)</p>	<p>2 cepas bacterianas: - SRB <i>Desulfovibrio caledoniensis</i>^o - <i>Escherichia coli</i>* y medio PBS suspendido</p>	<p>Recubrimiento por electrodeposición</p>	<p>Recubrimientos de Zn-Ni-Quitosano</p>	<p>Los autores analizaron la eficiencia de inhibición bacteriana cuando es añadido como ingrediente funcional el quitosano en los recubrimientos electrodepositados de la aleación Zn-Ni. Se realizaron diferentes pruebas con 3 diferentes concentraciones de quitosano (0.2 g/L, 0.6 g/L y 1 g/L), donde Acs₂ y Acs₃ presentaron mitigación de la concentración bacteriana superior a 80% e incluso llegando hasta una inhibición microbiológica de 93% (Acs₃), mientras que la concentración Acs₁ presento una tasa de esterilización de aproximadamente 70%; sin embargo, aunque la propiedad antibacteriana fue menor en comparación de las otras concentraciones, esta revelo ser la de mayor resistencia a la corrosión en el medio de SRB según los resultados obtenidos del ensayo EDX. Para analizar la presencia de quitosano en los revestimientos sea realizaron ensayos FTIR, donde se demostró la presencia de la molécula de quitosano completa en el recubrimiento y también se obtuvo conclusiones reveladoras, las</p>

Referencia	Material	Microorganismos involucrados	Método de prevención y/o protección	Compuesto activo	Resultados y conclusiones
					<p>cuales eran que al aumentar la concentración de este disminuía la concentración de Ni en el recubrimiento ($ACS_1=7.4\%Ni$, $ACS_2=6.4\%Ni$ y $ACS_3=3.2\%Ni$), lo que a su vez disminuía la resistencia a la corrosión, esto último se comprobó mediante la medición de las velocidades de corrosión de cada concentración ($ACS_1=0.27mm/y$, $ACS_2=0.30mm/y$ y $ACS_3=0.29mm/y$). En general, aunque el quitosano aumentaba la propiedad antibacteriana de los recubrimientos Zn-Ni electrodepositados, este hacía que el potencial de electrodeposición fuera fuertemente negativo al adsorberse en las superficies de deposición y si las concentraciones son muy altas de este, generaba que el recubrimiento disminuyera propiedades anticorrosivas y se presentarían picaduras en el acero a proteger; por ende, se necesita más estudios relacionados antes de ver si es una posible alternativa para mitigar la MIC</p>
(H. Cai et al., 2020)	Aluminio $\geq 99.99\%$ Placas (0.8cm * 0.8cm * 0.1cm)	- SRB <i>Desulfovibrio sp.</i> °	Película inteligente que por medio de iones sulfuro induce biocida	Película supramolecular metal-fenólica (TCS@CTAB-(TA-Fe ^{III}) ₂₀)	<p>Los estudios de estos autores demostraron crear una película inteligente capaz de mantener un comportamiento antibacteriano durante un tiempo prolongado debido a su carácter de respuesta ante el ion sulfato (S^{2-}), lo que mejora la resistencia a la corrosión microbiológica (El sistema receptivo comienza a liberar cuando la concentración de S^{2-} es superior a 10mM o en el caso que se presente un entorno con presencia de SRB en un largo periodo de incubación). El efecto que tiene la película protectora TCS@CTAB-(TA-Fe^{III})₂₀ es que la cantidad de células de SRB en la película se reduce significativamente bajo el corto periodo de incubación; efecto que incluso después de la incubación de 14 días, sólo se pueden encontrar raras células individuales con una deformación bastante evidente en la superficie de la película. Después de distintas pruebas (electroquímicas y exposición) la muestra recubierta con la película logró evidenciar una estructura morfológica superficial libre de picaduras, además de densidades de corriente más bajas, lo que sugiere su notable efecto de protección contra la corrosión durante un largo periodo de tiempo. De forma global, el concepto del sistema funcional de liberación controlada introducido aquí puede ofrecer una protección microbiológica contra la corrosión durante mucho tiempo para los metales subyacentes en el entorno marino.</p>
(Zhai et al., 2020)	Acero al carbono Q235 Cupones de (1cm ²)	Cepas bacterianas: - <i>Escherichia coli</i> *	Película por electrodeposición (Inducidos por un electrolito con	Nano pilares de óxido de Zinc	<p>Los autores de este artículo lograron estudiar los efectos que tiene la creación de nanopilares de Zinc por electrodeposición modificando el electrolito de trabajo con diferentes concentraciones de capsaicina (0,2gL⁻¹, 0,6gL⁻¹ y 1,0gL⁻¹) y cómo</p>

Referencia	Material	Microorganismos involucrados	Método de prevención y/o protección	Compuesto activo	Resultados y conclusiones
	superficie expuesta)	- SRB <i>Desulfovibrio caledoniensis</i> ^o	adición de capsaicina)		este recubrimiento de ZnO/Zn tiene la capacidad de reducción el 99,96% de la adhesión total den las bacterias para el caso del recubrimiento CIZ2 (0,6gL ⁻¹), logrando matar 40% de las bacterias que alcanzaron a adherirse a la superficie, mostrando en forma, que las películas de nanopilares de ZnO/Zn inducidos por la capsaicina poseen buenas propiedades antibacterianas; sin dejar atrás, el ensayo de 14 días en el medio incubado con <i>SRB</i> indicó que el recubrimiento obtenido con el electrolito modificado tiene una mayor resistencia a la corrosión que el recubrimiento electrodepositado de forma regular. La película CIZ2 mostró las mejores propiedades anticorrosivas entre las analizadas.
(Arunima et al., 2021)	Acero dulce (bajo carbono) Cupones (3.5cm * 2.5cm * 0.1cm)	Cepa bacteriana: - <i>Bacillus subtilis</i> - <i>Escherichia coli</i> - Bacterias mixtas de agua de mar.	Recubrimiento (Galvanización en caliente HDG)	Recubrimiento nanocompuesto de zinc basado en un compuesto biocida de WO ₃ /BiVO ₄ (WBV)	El presente estudio logra mostrar la creación de una película protectora modificando un galvanizado regular en caliente (HDG) con la adición de 2% w/w de compuesto 1:4 de WO ₃ /BiVO ₄ en el baño de Zn; impidiendo que la capa permita la formación de una biopelícula de bacterias por diferentes factores de este recubrimiento, entre ellos está la baja rugosidad de la superficie y a la presencia de partículas compuestas biocidas mencionadas anteriormente; este compuesto tienen un bandgap estrecho y una tasa de recombinación electrón-hueco reducida para generar especies reactivas de oxígeno ROS en la superficie del recubrimiento, lo que denota una eficacia cuando de inhibición de corrosión se trata, claro está, en entornos marinos agresivos y resistiendo así a la biocorrosión de cultivos bacterianos seleccionados. Las ROS generadas atacan a los fosfolípidos poliinsaturados, lo que conduce a la desnaturalización de la membrana celular, aumenta la permeabilidad de la célula y provoca la muerte de las células bacterianas. La baja tasa de corrosión y los elevados valores de resistencia a la transferencia de carga mostrados por el recubrimiento compuesto incluso tras una exposición prolongada en medio bacteriano (28 días) indican la estabilidad a largo plazo. De forma global, el recubrimiento cumple todos los requisitos para la prevención sostenida de la biocorrosión y ofrece aplicaciones potenciales en entornos marinos.
(J. Li et al., 2021)	Aleación de aluminio Al 6N01 Cupones (5mm * 5mm * 2mm)	Cepa bacteriana: - <i>Escherichia coli</i> , - <i>Bacillus subtilis</i> - SRB <i>Desulfotomaculum nigrificans</i>	Recubrimiento ecológico (Crecimiento in situ de un solo paso para preparar películas)	Películas de doble hidróxido estratificado LDH de Li- Al + 4-amino-2-((hydrazine methylene) amino)-4-oxobutanoic acid (ácido AOA) +1H,1H,2H,2H-	En el siguiente artículo investigativo los autores estudiaron las propiedades antiincrustante, anticorrosiva y de hidrofobicidad de un recubrimiento, de doble hidróxido de Li-Al (AFLDH de tipo Hidrotalcita) sobre una aleación de aluminio con dos compuestos modificadores AOA y PFOTES, mostrando así que la preparación consume poca energía y es respetuosa con el medio ambiente,

Referencia	Material	Microorganismos involucrados	Método de prevención y/o protección	Compuesto activo	Resultados y conclusiones
				Perfluorooctyltriethoxysilane PFOTES)	basándose en el autoensamblaje a temperatura ambiente, las películas poseen una excelente propiedad antibacteriana pues los valores alzados fueron de 97,44% para <i>Escherichia coli</i> (gran negativa), 98,04% para <i>Bacillus subtilis</i> (gran positiva) y 96,99% para SRB <i>D. nigrificans</i> . La película AFLDH preparada por intercalación de AOA y PFOTES mejora significativamente la capacidad hidrofóbica del recubrimiento alcanzando valores cercanos a lo 140° en CA. Estos resultados fueron corroborables gracias a ensayos y pruebas electroquímicas (EIS, OCP), espectroscopía (ESI-MR, FT-IR, XPS, EDX) y microscopía (AFM). A modo global con este estudio y basado en las mediciones electroquímicas de la corrosión, las pruebas anti-biofouling y el desempeño hidrofóbico del recubrimiento logran demostrar el alto rendimiento de la película AFLDH a tal punto que puede ser una buena alternativa para el control de la MIC.
(Du et al., 2019)	Acero al carbono Q235 Barras (Diámetro 10mm y altura 3mm)	NO hay bacterias sin embargo usan medio de ácido sulfúrico concentrado (95%-98%) y peróxido de hidrógeno (30%) en una proporción de volumen de 7:3	Tratamiento superficial superhidrofóbico (Grabado químico)	Formación de una estructura irregular en forma de agujas y tratamiento de fluoración usando (1H,1H,2H,2H-perfluorodecyl)-triethoxysilane (PFTEOS , 97%)	Con el presente estudio los autores lograron reproducir una superficie superhidrofóbica (ángulo de contacto de 161,6°) preparada que mostró una estabilidad química hacia diferentes soluciones con pH entre 1 a 14 manteniendo los valores de repelencia en superiores a 140° en el ángulo de contacto. La superficie superhidrofóbica sobre el acero al carbono Q235 se encontraba en estado Cassie-Baxter, por lo que la capa de aire existente podía aislar la interfaz sólido-líquido logrando inhibir la corrosión producida por soluciones altamente corrosivas (HCl y CuSO ₄). Adicionalmente estudios electroquímicos mostraron una disminución del I _{corr} del acero al carbono Q235 superhidrofóbica (aprox. 0,577 μA/cm ² , contra (6,601 μA/cm ²) del Q235 no tratado; mientras tanto, el EIS mostró valores de un semicírculo con impedancia más alta para la superficie tratada. Los resultados sugieren que las muestras de acero al carbono Q235 tratadas superhidrofóbicamente presentan una excelente resistencia a la corrosión.

Nota: (*) Cuando se usó el medio estandarizado Luria-Bertani LB para el estudio biocorrosivo; (•) Cuando se usó el medio estandarizado Postgate modificado para el estudio biocorrosivo

Apéndice C

Representación gráfica de la cuantificación del material estudiado (acero al carbono, acero inoxidable o aluminio) según las categorías preestablecidas.

