

**CORROSION EN TUBERÍAS SUBTERRANEAS Y SUMERGIDAS EN
AMBIENTES MARINOS Y MEDIOS DE PROTECCION
ANTICORROSIVOS EN ACUEDUCTOS, GASODUCTOS Y
OLEODUCTOS**



Marlon Yoel Esteban Valencia

**PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL, CIVIL Y
QUÍMICA**

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
PAMPLONA, SEPTIEMBRE DEL 2020**

**CORROSION EN TUBERÍAS SUBTERRANEAS Y SUMERGIDAS EN
AMBIENTES MARINOS Y MEDIOS DE PROTECCION
ANTICORROSIVOS EN ACUEDUCTOS, GASODUCTOS Y
OLEODUCTOS**

Marlon Yoel Esteban Valencia

**Trabajo de monografía presentado como requisito para optar al título de
INGENIER(A)O QUÍMIC(A)O**

Director: NOMBRE DIRECTOR(A)

Dra. Jacqueline Corredor Acuña

**PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL, CIVIL Y
QUÍMICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
Pamplona, Septiembre del 2020**

Dedicatoria

Dedicado primeramente a Dios, a mi familia por el apoyo y arduo trabajo durante tantos años de formación académica, a mi padre Orlando Esteban Pallares y a mi madre Sandra Mildred Valencia por sus consejos, apoyo y sabias direcciones en mi camino, a mi abuelo Adalid Valencia por apoyarme en cada paso y guiarme y especial dedicatoria a mi abuela Cilia Badillo, a quien le atribuyo todos mis logros y metas propuestas en la vida.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, agradecimiento a Dios por las habilidades y talentos que me ha permitido desarrollar a lo largo de mi camino profesional, a mi madre, mi padre por el apoyo incondicional y por ser mis mayores ejemplos e impulsores en la vida, a mi familia por acompañarme en este proceso de arduo trabajo, a los docentes que hicieron parte de mi formación, a mi abuelo por ayudarme enormemente en mi crecimiento personal y profesional, y especial agradecimiento a mi abuela, mujer de carácter, humildad y nobleza, de la que aprendí y desarrolle valores que me forman como persona y como profesional y la que ha sido el motor principal de todas mis metas propuestas al día y a futuro.

GLOSARIO

Abreviaturas

- Protección catódica (CP)
- Metales pesados (MP)
- Bacterias sulfato reductoras (SRB)
- Termografía de fase pulsada (PPT)
- Termografía de componentes principales (PCT)
- Electromagnético (EM)
- Close Interval Potential Survey CIPS
- Direct Current Voltage Gradient (DCVG)
- Corriente de dirección continua (CC)
- Corriente alterna (AC)
- Resistividad (R)
- Soterrar: enterrar, poner bajo la tierra.
- Áreas de protección natural (ANP)
- Polipropileno (PP)
- Fusión epoxílica fundida (FBE, fusión bounded epoxy)

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	12
2. planteamiento y JUSTIFICACIÓN	14
3. OBJETIVOS	15
3.1 Objetivo general	15
3.2 Objetivos específicos.....	15
4. ESTADO actual.....	16
4.1 condiciones de los medios.....	16
4.1.1 Condiciones de los suelos en zonas urbanas.....	16
4.1.1.1 Resistividad del suelo	16
4.1.1.2 Compuestos presentes en los suelos que inhiben a la corrosión.....	17
4.1.2 Condiciones de las fuentes de acuíferas.....	18
4.1.2.1 Propiedades físicas	18
4.1.2.2 Propiedades químicas.	19
4.2 fenomenos de corrosion en las tuberías.....	20
4.2.1 Clasificación de la corrosión según el medio.	20
4.2.1.1 Corrosión química	20
4.2.1.2 Corrosión electroquímica	20
4.2.2 Tipos de corrosión.....	21
4.2.2.1 Corrosión generalizada	21
4.2.2.2 Corrosion localizada.	22
4.2.2.3 Corrosión galvánica.	22

4.2.2.4	Corrosión por fisura o agrietamiento.....	23
4.2.2.5	Corrosión por picadura	23
4.2.2.6	Corrosión por erosión.	23
4.2.3	Factores que influyen en la corrosión.	23
4.2.3.1	Acidez	23
4.2.3.2	Concentración de oxígeno	24
4.2.3.3	Sales disueltas.....	24
4.2.3.4	Temperatura.....	24
4.2.3.5	Corrientes parásitas.....	25
4.2.4	Corrosión externa en tuberías sumergidas y enterradas.....	25
4.2.4.1	QUÉ SE BUSCA	26
4.2.4.2	IMPACTO GENERADO	26
4.2.4.3	CONSECUENCIAS	26
4.3	métodos de protección y mitigación.....	27
4.3.1	Recubrimientos de tipo poliméricos o pinturas.	27
4.3.1.1	Recubrimiento de epoxi unido por fusión (FBE)	28
4.3.1.2	Sistema duval FBE Y PP	28
4.3.2	Recubrimientos que actúan como ánodos de sacrificio y protección catódica..	28
4.3.2.1	Recubrimientos como ánodos de sacrificio	28
4.3.2.2	Recubrimientos y protección catódica.....	29
4.3.3	Protección anódica y catódica.....	29
4.3.3.1	Protección catódica.....	29
4.3.3.2	Protección anódica.....	30
4.4	Métodos y mecanismos de detección de la corrosión	32
4.4.1	Termografía infrarroja (TIR).....	32
4.4.1.1	Termografía de fase pulsada (PPT)	32
4.4.1.2	Termografía de componentes principales (PCT).....	32

4.4.2	Reflectómetro en el dominio del tiempo (TDR)	32
4.4.3	Técnica de inspección CIPS.....	33
4.4.4	Técnica de inspección DCVG.....	33
4.4.5	Método termo gráfico	33
4.4.6	Modelo de red neuronal BP de corrosión en tuberías	34
4.4.7	Método electromagnético.....	34
5.	ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS	34
5.1.1	Análisis nacional realizado en Bogotá Colombia	35
5.1.1.1	Otros estudios realizados en el sector nacional en Villavicencio, Colombia	36
5.1.2	Análisis internacional realizado en la ciudad de México y Morelia.....	37
5.2	rESULTADOS del ESTUDIO de la RESISTIVIDAD DEL SUELO	38
5.3	RESULTADOS DE LA EVALUACION DE LA CORROSION EXTERNA EN TUBERIAS SUBTERRANEAS DE UN ACUEDUCTO	40
5.4	rESULTADOS OBTENIDOS EN EL ESTUDIO DE CORRIENTES PARASITAS EN TUBERIAS PARALELAS DE UN GASODUCTO.	40
5.5	corrosion efectuada por bacterias sulfatoreductoras en diferentes tipos de metales de aplicación ingenieril	41
5.5.1	Afectación de la capa de pintura anticorrosiva que recubre la tubería	43
5.6	corrosion localizada por picadura DEL ACERO AUTENITICO 316L POR EFECTO DE LA TEMPERATURA en solucion salina.	43
5.7	CORROSION BAJO PRESION INDUCIDA E HIDRAULICA DE TUBERIAS SUBMARINAS.....	45
5.8	acerca de los Métodos de proteccion.....	46
6.	RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	50
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
8.	anexos	56

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Agresividad corrosiva en función a la resistividad del suelo.....	16
Tabla 2. Concentración de cloruros y grado de corrosión	17
Tabla 3. Conductividad eléctrica en diferentes tipos de agua.....	19
Tabla 4. Serie electroquímica/galvánica de metales presentes en agua de mar.....	31
Tabla 5. Datos obtenidos en los ensayos a diferentes localidades de la ciudad de Bogotá y Soacha en función de la densidad poblacional, precipitación, uso del suelo y tráfico vehicular.	35
Tabla 6. Concentración de metales pesados en (mg/kg) del polvo vial de tres zonas en la ciudad de Villavicencio.	36
Tabla 7. Estadística descriptiva de los metales pesados contenidos en los suelos con asentamiento urbano en Morelia, Michoacán, México.....	37
Tabla 8. Resistividad (ρ) del suelo obtenidos en distintos puntos del gasoducto.....	39
Tabla 9. Valores de pH obtenidos en las zonas de estudio.	39
Tabla 10. Porcentaje de área cubierta.	42
Tabla 11. Resultados de las propiedades analizadas y metales pesados en las muestras de suelo	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ilustración de una celda electroquímica.	21
Figura 2. Arreglo de metales y aleaciones más empleadas en una serie galvánica.	22
Figura 3. Corrosión por picadura en superficies metálicas.	23
Figura 4. Corrosión de tuberías enterradas.	26
Figura 5. Componentes que conforman un revestimiento polimérico.	27
Figura 6. Detección del daño en la tubería por variación de la impedancia.	33
Figura 7. Esquema termo gráfico de una sección de tubería con irregularidades.	34
Figura 8. Resistividad del suelo a distintas profundidades.	38
Figura 9. Distribución potencial de las líneas de un oleoducto a distintas separaciones.	41
Figura 10. Ensayos realizados para distintos tipos de metales de aplicación ingenieril en presencia de bacterias sulfato reductoras en un reactor anaerobio.	42
Figura 11. Superficie anticorrosiva después de 10 días de incubación en el bio-reactor (zoom: x48)	43
Figura 12. Efecto de la temperatura sobre la rapidez de corrosión del Acero inoxidable austenítico 316 L en medio salino	44
Figura 13. Micrografía del acero inoxidable austenítico 316L expuesta a ensayos electroquímicos a 45 y 60 °C. (magnificación superior 100X. Magnificación inferior 600X).	45
Figura 14. Relación entre la presión de falla y la de corrosión a (a) una profundidad, (b) a lo ancho, (c) a lo largo	46
Figura 15. Recubrimientos empleados por la industria del gas y de petróleo a lo largo del tiempo	47
Figura 16. Recubrimientos externos que se emplean en el sector de petróleo y gas.	58

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas más críticos en las industrias, es la corrosión presente en las tuberías que se encuentran en los procesos industriales y son generalmente empleadas para el transporte de sustancias valiosas (Lee et al., 2015). Uno de los métodos de mayor eficiencia en el transporte a larga distancia de diferentes productos o materias de gran interés como el petróleo, gas y compuestos líquidos como el agua, es la implementación de tuberías subterráneas y/o sumergidas. La gran mayoría de estas líneas por requerimiento industrial deben ser enterradas o sumergidas (Gonzales Boza & Cruz Castro, 2017), en especial las tuberías de los acueductos, se encuentran en medios subterráneos, los que presentan un mayor riesgo de falla especialmente en las zonas urbanas debido a la corrosión causada por los diferentes tipos de desechos con alto contenido de sustancias altamente corrosivas, como lo son los metales pesados que se derivan de diversos productos y pueden ser bastante agresivos (Ganiyu et al., 2018). A pesar de las enormes ventajas que nos ofrecen las tuberías metálicas o en su defecto aleaciones de estos mismos, se enfrenta a uno de los problemas más difíciles de contrarrestar en todas las operaciones en las que se involucre, el fenómeno de la corrosión está presente en componentes metálicos como; tuberías, tanques, equipos, piezas mecánicas, etc. A lo largo de los años se han realizado numerosos estudios y se han utilizado una gran variedad de métodos que ayudan a mitigarla o en el mejor de los casos reducir la velocidad con la que ocurre.

El deterioro que sufren las tuberías, está directamente relacionado con el medio y las condiciones en las que estas se encuentren. En esta compilación bibliográfica, abarcaremos las condiciones en ambientes subterráneos y sumergidos (Lahiri, 2017). El transporte de ciertas sustancias, las que comprenden cientos de kilómetros para abastecer una planta química o una operación en concreto, se realizan generalmente bajo tierra debido principalmente a la distribución del espacio el que se encuentra muy delimitado en las zonas urbanas y también agrega un factor de seguridad que evita que estas estén expuestas y generen un riesgo inminente a la integridad de las infraestructuras y a la salud humana. De esta forma, el transporte de estas materias, como el abastecimiento del petróleo y gas desde un yacimiento hasta las instalaciones de procesamiento, deben atravesar en ocasiones lagos, ríos, mares y en algunos casos infraestructura vial. Bajo estas condiciones a las que son sometidas las tuberías, el material

reduce gradualmente su resistencia mecánica aumentando las posibilidades de fallo en la estructura a lo largo del tiempo (Gomes et al., 2013).

Los estudios realizados en torno al tema de la corrosión en los materiales, buscan en su gran mayoría métodos o técnicas para ralentizarla o mitigarla completamente. En cuanto a los métodos más empleados en el control de la corrosión externa en tuberías sumergidas o subterráneas, se recurre a un procedimiento estándar de aislamiento por medio de recubrimientos con alta resistencia eléctrica que delimitan el medio y la estructura que se desea proteger o empleando técnicas de protección catódica (CP) (Papavinasam, 2014). Otras de las medidas que se utilizan en la prevención de la corrosión son: La neutralización, adición de inhibidores, protección anódica, pinturas y recubrimientos (Lahiri, 2017).

En esta compilación bibliográfica, se estudió cómo afecta el fenómeno de corrosión la capa exterior de las tuberías que se encuentran sumergidas en distintos medios y que métodos o mecanismos de protección pueden ser empleados para llevar a cabo la mitigación o ralentización de este.

2. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN

2.1 PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

La importancia de transportar sustancias o materiales es vital e indispensable hoy día para la realización de infinidad de operaciones a nivel industrial y para suplir necesidades básicas de saneamiento y consumo en una comunidad. Para esto existen diversos materiales y mecanismos mediante los que podemos llevar a cabo el procesamiento y transporte de sustancias como lo son las tuberías, que pueden llegar a ser de concreto, polímeros o metales dependiendo de las condiciones operacionales, uso específico y medio en el que se encuentra la operación o proceso (Montilla Parra, 2017). En este caso en específico se centró en los medios subterráneo y sumergido, donde las condiciones de estos suelen ser muy agresivos y atacan con mayor facilidad a las tuberías metálicas provocando el fenómeno de corrosión externa, la que debilita la estructura del material y por consiguiente reduce la efectividad de protección de las sustancias transportadas A. Jake Abes (como se citó en Wang et al., 2015). En resumen, bajo estas condiciones a las que son sometidas las tuberías, el material gradualmente comienza a reducir su resistencia mecánica aumentando las posibilidades de fallo en la estructura a lo largo del tiempo (Gomes et al., 2013).

Informes y estudios realizados en el campo industrial, muestran que aproximadamente un 40% de las fallas en la integridad de las tuberías de los oleoductos y gaseoductos, son causadas por corrosión externa (Gadala et al., 2016). Estudiar el fenómeno de la corrosión externa en tuberías sumergidas o enterradas, es de suma importancia para la carga segura de materias primas valiosas que deben ser transportadas a larga distancia (Wang et al., 2015). Indagar sobre los diversos métodos para mitigar o ralentizar la corrosión pueden ayudar a la efectividad operacional de los procesos en la industria y aumentar la vida útil de las tuberías que está directamente asociada a la reducción de los costos de mantenimiento de las instalaciones y el aumento de la eficacia del costo-operabilidad en una planta (jhon avila piracoca, 2018).

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

- Realizar un estudio compilativo sobre la corrosión externa que se da en las tuberías de diversos procesos que se encuentran en condiciones agresivas (enterradas o sumergidas) y estudiar los distintos métodos de protección o mitigación que actualmente se emplean o se están desarrollando.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar los tipos de corrosión externa que se presentan en tuberías subterráneas, sumergidas y submarinas.
- Estudiar las características de los medios y los factores que influyen en el proceso de corrosión en las tuberías.
- Detectar los distintos métodos de mitigación o protección como: Protección catódica o anódica y los distintos tipos de recubrimientos que actualmente se emplean para el control de la corrosión externa.

4. ESTADO ACTUAL

4.1 CONDICIONES DE LOS MEDIOS

4.1.1 Condiciones de los suelos en zonas urbanas

Los suelos en las zonas urbanas, son los medios más afectados por la presencia de metales pesados (Zafra-mejía et al., 2020 ;Ganiyu et al., 2018b). Los factores contaminantes en los medios son extremadamente importantes, según autores, únicamente las substancias que se encuentran en concentraciones no elevadas tienen mayor relevancia que aquellas de concentraciones elevadas, ya que pueden contener impurezas que puedan actuar y acelerar el ataque químico (Escuela politecnica Nacional, 2012).

4.1.1.1 Resistividad del suelo

El parámetro más utilizado para determinar qué tan agresivo es un suelo y que tan corrosivo es para los materiales metálicos como tuberías, es la resistividad del suelo (R), como se observa en la Tabla 1, la que está en función de la resistencia específica del suelo ρ , de la longitud de camino eléctrico l, y del área de la sección transversal de los electrodos A y se obtiene por medio de la ecuación 1 (Angel & Veleva, 2017).

$$R = \rho \cdot l/A \quad \text{Ecuación 1.}$$

Tabla 1. Agresividad corrosiva en función a la resistividad del suelo

Suelo	Resistividad
Corrosividad	ρ (Ω -cm)
Altamente corrosivo	0-1000
Corrosivos	1001-5000
Poco corrosivo	5001-10000
Muy poco corrosivo	10000 en adelante

Fuente : (Angel & Veleva, 2017)

4.1.1.2 Compuestos presentes en los suelos que favorecen la corrosión.

4.1.1.2.1 Cloruros

Este tipo de compuesto se encuentran en los suelos en forma de ion cloruro que son altamente solubles y se encuentran mayoritariamente disueltos en el agua contenida en zonas subterráneas (Reyes Gonzales & Torres Roa, 2016). Su característica iónica permite que participe en la reacción anódica del metal y tenga un alto grado de corrosión dependiendo de las concentraciones como se evidencia en la Tabla 2, las que provocan una disminución en la resistividad del suelo (Covarrubias Sanz, 2010).

Tabla 2. Concentración de cloruros y grado de corrosión

Cloruros (ppm)	Grado de Corrosión
>5.000	Severa
1.500 – 5.000	Considerable
500 – 1.500	Poco corrosivo
< 500	No corrosivo

Fuente: (Covarrubias Sanz, 2010)

4.1.1.2.2 Sulfatos

La presencia de sulfatos en los suelos, determina la agresividad de estos debido a la alta solubilidad y gran efecto corrosivo que presentan. Los sulfatos pueden ser más destructivos para los metales si por acción de bacterias anaeróbicas reductoras de sulfato pasan a ser sulfuros corrosivos (Covarrubias Sanz, 2010).

4.1.1.2.3 Sulfuros

Este proceso es el resultado de una actividad metabólica de los microorganismos de la tierra en condiciones anaerobias mediante la oxidación del hidrógeno del suelo utilizando el ion sulfato que se reduce a sulfuros, generando una corrosión continua más conocida como corrosión anaerobia (Covarrubias Sanz, 2010).

4.1.1.2.4 Carbonatos

Son sales que en la mayoría son poco solubles en el agua y son formados por reacciones que se dan en los minerales de las rocas o por transporte del viento o del agua. Un suelo con pH de 7,5 a 12 en presencia de iones de carbonato CO_3 favorecen la adsorción y precipitación de metales pesados en el medio (Covarrubias Sanz, 2010).

4.1.1.2.5 Microorganismos sulfato reductores

Reportes sobre estudios de corrosión microbiológica de los materiales empleados en ingeniería sugieren que aproximadamente el 50% de los costos se presentan por procesos corrosivos de bio-corrosión Russi et al., n.d. (como se citó en Monroy Cruz, 2014).

4.1.2 Condiciones de las fuentes de acuíferas.

4.1.2.1 Propiedades físicas

El agua es una de las sustancias químicas más abundantes del planeta, y es generalmente conocida por ser un solvente universal, es decir, que es un elemento capaz de disolver una gran variedad de sustancias químicas debido a su capacidad de formar puentes de hidrogeno con un gran número de sustancias. Debido a estas propiedades, el agua puede actuar como catalizador o iniciador en innumerables procesos químicos, como los procesos corrosivos por medio de la electrolisis del agua o más conocido como el fenómeno electroquímico, el que en presencia de sustancias que actúan como electrolitos, puede conducir cierta intensidad de corriente y contribuir a reacciones de óxido-reducción de compuestos metálicos que se encuentren inmersos en este medio (Valenzuela, 2014).

4.1.2.1.1 Conductividad eléctrica.

Una de las diferencias que existe entre el agua de mar y el agua de los lagos, ríos y pozos, es la alta concentración de compuestos químicos ionizados o disueltos en esta como las sales, es decir, el agua de mar presenta una mayor conductividad eléctrica como se muestra en la Tabla 3, debido a la concentración de electrolitos disueltos en ella, a diferencia de las fuentes de agua dulce, que también contienen la gran parte de este tipo de compuestos pero en concentraciones

inferiores, por lo que, presenta baja conductividad eléctrica que es directamente proporcional a la concentración de los iones disueltos (Albeitar, 2013 ; Cornejo-ortega, 2015 ; Valenzuela, 2014).

Tabla 3. Conductividad eléctrica en diferentes tipos de agua.

Conductividad eléctrica del agua.	
Tipo de agua	Conductividad [$\mu\text{S}/\text{cm}$]
Agua pura	0,055
Agua destilada	0,5
Agua de montaña o efluentes	1,0
Agua tratada	500-800
Agua de mar	50.000-60.000

Fuente: (Albeitar, 2013); (Sardi, 2009).

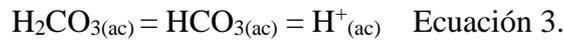
Como se evidencia en la Tabla 3, la conductividad eléctrica del agua de mar en relación al agua pura o proveniente de efluentes naturales es muy superior, lo que denota una alta concentración de sales disueltas o en su defecto, iones disueltos.

4.1.2.2 Propiedades químicas.

4.1.2.2.1 PH de las fuentes hídricas.

Este parámetro, está estrechamente relacionado con la conductividad eléctrica, y expresa que tan ácida o básica puede llegar a ser la sustancia o en su defecto, distintos tipos de soluciones, en otras palabras, representa la acidez o la alcalinidad de estas. El pH no relaciona la cantidad de compuestos que se encuentran disueltos en las fuentes hídricas, sino que está directamente relacionado a la fuerzas que los comprenden (Albeitar, 2013). Cabe destacar que en las fuentes de agua, especialmente las marinas, el carbono inorgánico en forma de CO_2 , HCO_3^- y el CO_3^{2-} , actúan como sustancias amortiguadoras de pH lo que mantiene estable la concentración de los iones H^+ disueltos como se describe en las ecuaciones 1 a 3, las que involucran iones de C

en solución acuosa (Cornejo-ortega, 2015). También se conoce que el pH del agua de mar en promedio a nivel global oscila cerca al valor de 8 o más (medio básico).



4.2 FENÓMENOS DE CORROSIÓN EN LAS TUBERÍAS

El fenómeno de la corrosión es un proceso de naturaleza electroquímica y es la principal responsable de la degradación de los materiales metálicos que se encuentran en distintos medios y se pueden clasificar en diversos tipos (Lahiri, 2017).

4.2.1 Clasificación de la corrosión según el medio.

4.2.1.1 Corrosión química

Este tipo de corrosión se da en condiciones donde el metal reacciona con un medio no iónico, como el caso de la oxidación que ocurre a partir del aire a temperaturas elevadas (Escuela politecnica Nacional, 2012).

4.2.1.2 Corrosión electroquímica

Ocurre por medio de un transporte de electrones o flujo eléctrico usando como medio un electrolito como se ilustra en la Figura 1, y en presencia de una zona anódica y otra catódica, tal como puede ocurrir la corrosión en los suelos, en el agua de mar y cuando se exponen a condiciones atmosféricas (Escuela politecnica Nacional, 2012), que pueden ser descritas por los mecanismos de reacción presentado en las ecuaciones 5 y 6 (Salazar-Jiménez, 2015). Para que este proceso pueda efectuarse, se necesita de tres constituyentes primordiales, los electrodos, que son comprendidos por un metal que actúa como ánodo y otro como cátodo, un medio electrolítico en el que los electrones puedan fluir libremente y por último, una fuente de

alimentación eléctrica que genere una diferencia de potenciales entre los electrodos (ECCA, 2011).

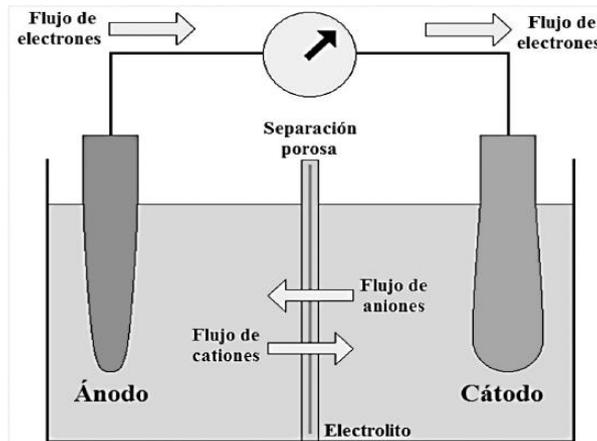


Figura 1. Ilustración de una celda electroquímica.

Fuente: (Salazar-Jiménez, 2015)

Las ecuaciones que describen este fenómeno son las siguientes:

- Reacción ocurrente en el ánodo (Oxidación).



- Reacción ocurrente en el cátodo (Reducción).



4.2.2 Tipos de corrosión.

En esta compilación bibliográfica abarcaremos únicamente los tipos de corrosión más influyentes para el estudio.

4.2.2.1 Corrosión generalizada

Comúnmente conocida como corrosión uniforme, ya que ocurre homogéneamente sobre las superficies metálicas a base de hierro no aleado con materiales inoxidables, y es el tipo de

corrosión que provoca mayor pérdida, la que es altamente influenciada por la presencia de impurezas que inducen a una variación en la energía potencial (Salinas, 2010). La corrosión uniforme es la forma de corrosión más fácil de estudiar y tratar, ya que permite determinar fácilmente la vida útil de los materiales afectados debido a que ocurre homogéneamente sobre la superficie (Rodríguez Remigio, 2019).

4.2.2.2 Corrosión localizada.

Se da por pequeñas imperfecciones irregulares o agujeros en la superficie del material que lo exponen a los medios permitiendo que ocurra un ataque directo sobre este, lo que puede tener diversas causas como impurezas, perturbación metalúrgica e imperfecciones en la estructura del material (Salinas, 2010).

4.2.2.3 Corrosión galvánica.

Ocurre cuando dos metales de diferente naturaleza están en contacto físico o eléctrico entre ellos y que en presencia de una solución electrolítica el material de menor potencial electroquímico se corroe y forma lo que se conoce como celda electroquímica como se detallan en la Figura 2, la que mediante los distintos tipos de arreglos metálicos podemos obtener una serie galvánica (Salazar-Jiménez, 2015)



Figura 2. Arreglo de metales y aleaciones más empleadas en una serie galvánica.

Fuente : En referencia a la presentada por el autor, (ECCA, 2011).

4.2.2.4 Corrosión por fisura o agrietamiento.

Comúnmente se le denomina fatiga a causa de la corrosión y aparece únicamente por acción de la misma, se da principalmente en estructuras que están sometidas a ciertos esfuerzos como lo son los equipos rotativos, ejes, etc. (Salinas, 2010).

4.2.2.5 Corrosión por picadura

Es uno de los tipos de corrosión más riesgosos que se puede presentar, estos generalmente se hallan de forma arbitraria a lo largo de la superficie pasiva del metal y se extiende lentamente hacia la zona interior causando fallas estructurales graves como se observa en la Figura 3 (Escuela politecnica Nacional, 2012).



Figura 3. Corrosión por picadura en superficies metálicas.

Fuente: (Escuela politecnica Nacional, 2012)

4.2.2.6 Corrosión por erosión.

Como tal, la erosión no es un tipo de corrosión si no un factor influyente en el proceso, el que lentamente desgasta la capa protectora de la superficie metálica dejándola expuesta al deterioro (Escuela politecnica Nacional, 2012).

4.2.3 Factores que influyen en la corrosión.

Las condiciones de los medios en los que los materiales metálicos son afectados por procesos químicos y electroquímicos se describen a continuación.

4.2.3.1 Acidez

Es uno de los factores con mayor influencia sobre el fenómeno corrosivo debido a que contiene mayor cantidad de iones H^+ presentes en la solución, la que busca recibir electrones para alcanzar la estabilidad química, esta capacidad de aceptar electrones crea un medio altamente corrosivo para los materiales metálicos que se encuentran en contacto con esta, perdiendo electrones (Salazar-Jiménez, 2015).

4.2.3.2 Concentración de oxígeno

La concentración de oxígeno que se presenta en un medio electrolítico (como el océano) es capaz de aumentar o disminuir la velocidad de corrosión que ocurre sobre el metal en función de la naturaleza del mismo Charng y Lansing (como se citó en Salazar-Jiménez, 2015). En metales de composición ferrosa, cuando se aumenta la concentración de oxígeno también aumenta la velocidad con la que ocurre el proceso de corrosión, contrario a los materiales pasivables, los que a mayor concentración de O_2 mayor será la capacidad que estos tendrán para formar una capa protectora (Salazar-Jiménez, 2015).

4.2.3.3 Sales disueltas

Al diluirse en una solución electrolítica, las sales, en este caso sales ácidas como el cloruro de aluminio, el cloruro de hierro y el cloruro de amonio, disminuyen su pH formando un medio ácido que como consecuencia provoca una aceleración en el proceso de corrosión del metal en contacto Charng y Lansing (como se citó en Salazar-Jiménez, 2015).

4.2.3.4 Temperatura

Cuando se incrementa la temperatura, se acelera el proceso difusivo de oxígeno presente en el medio hacia el metal, lo que provoca un aumento en la velocidad de corrosión afectando directamente el material e inclusive las capas de pasivación fragilizándolo Charng y Lansing (como se citó en Salazar-Jiménez, 2015). También, la temperatura puede causar un aumento en las cinéticas de las reacciones presentes cuando el material se encuentra en contacto con el medio, inclusive en las soluciones acuosas, aun estando a temperatura ambiente, pueden existir zonas del material que se encuentren a una temperatura mayor haciendo que esta se comporte de forma anódica respecto a la otra debido a la diferencia de temperatura entre las zonas

(Escuela politecnica Nacional, 2012). La temperatura, es el factor más influyente sobre el proceso corrosivo en las superficies metálicas.

4.2.3.5 Corrientes parásitas

Son corrientes que circulan a través de los materiales conductores (tubería, suelo, medio electrolítico) y desvían su dirección siendo conducidas hacia estructuras metálicas que son salidas anódicas, y por lo tanto se corroen (Zujur & Rosales, 2012). La corriente parasita afecta la vida útil y la operabilidad segura de las tuberías soterradas (Cui et al., 2016). A continuación, se nombra los 3 tipos de corriente parásita que se pueden presentar:

- Corriente de dirección continua (CC O DC)
- Corriente alterna (AC)
- Corriente telúrica de la tierra

Estas corrientes, en especial la CC, pueden ocasionar graves daños a las superficies exteriores de las tuberías que se encuentran enterradas debido a que estas corrientes vagabundas son provenientes de descargas hacia el suelo de corrientes directas (Alberto et al., 2014).

4.2.4 Corrosión externa en tuberías sumergidas y enterradas

Cuando las tuberías de abastecimiento y distribución de agua son instaladas bajo tierra, se enfrentan a posibles riesgos de falla que se deben primordialmente a dos factores, al envejecimiento del material y a la concentración elevada de metales pesados en los suelos, especialmente de zonas urbanas (Ganiyu et al., 2018).

La corrosión externa en las estructuras enterradas o sumergidas se desarrollan cuando se genera una celda de concentración. Generalmente se pueden desarrollar cuando un metal presenta contacto con un suelo que posee distintas características o en la mayoría de los casos, cuando la tubería se encuentra en una porción de suelo menos conductivo, esta se comportará como un cátodo, mientras que la fracción que se encuentra en una porción de suelo más conductivo actuará como un ánodo como se muestra en la Figura 4, provocando que se genere una celda de corrosión (Pierre R. (cómo se citó en Covarrubias Sanz, 2010)).

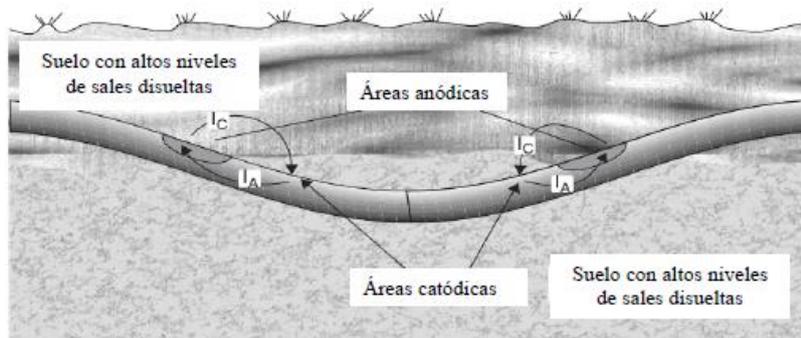


Figura 4. Corrosión de tuberías enterradas.

Fuente : (Covarrubias Sanz, 2010)

4.2.4.1 QUÉ SE BUSCA

Poder predecir la velocidad de corrosión en una tubería enterrada o sumergida de un oleoducto, acueducto o gasoducto, es de suma importancia para el transporte y operación segura de las sustancias que son transportadas. Existen innumerables estudios en los que se investigan como ocurren los mecanismos de corrosión, que factores influyen sobre estos (propiedades físico-químicas de los medios), métodos de detección e infinidad de mecanismos de protección (Ren et al., 2012).

4.2.4.2 IMPACTO GENERADO

Las fallas presentadas en las tuberías, en especial en condiciones marinas, ocasionan impactos negativos que pueden poner en riesgo la integridad humana, daños severos a la propiedad, contaminación de la flora y fauna y principalmente pérdidas económicas, es por esto que se debe dar gran importancia a los fenómenos corrosivos que ocurren en las estructuras industriales que se encuentran en contacto con nuestro entorno (Bringas Rodriguez, 2015).

4.2.4.3 CONSECUENCIAS

Se conoce que la industria de gas y petróleo transporta sustancias que pueden ser muy tóxicas y explosivas. A lo largo de los años se han reportado numerosos incidentes a causa de la corrosión que producen grandes daños, especialmente sobre el medio ambiente que afecta directamente los recursos naturales e impactos económicos por costos de tratamiento (Ren et al., 2012).

4.3 MÉTODOS DE PROTECCIÓN Y MITIGACIÓN

Se debe tener en cuenta que la corrosión en tuberías enterradas, se da cuando existe una descarga de corriente desde el metal hacia el suelo en las zonas que actúan como ánodos, mientras que en las zonas catódicas la dirección y flujo de la corriente se dirigen del suelo a la tubería (Reyes Gonzales & Torres Roa, 2016).

4.3.1 Recubrimientos de tipo poliméricos o pinturas.

Este tipo de recubrimientos están generalmente constituidos por una fase continua a la que se le conoce como vehículo el que se compone por un solvente, una resina que actúa como ligante y una fase discontinua que se compone por distintos aditivos y pigmentos. En la Figura 5 se detalla los componentes que conforman a un revestimiento polimérico.

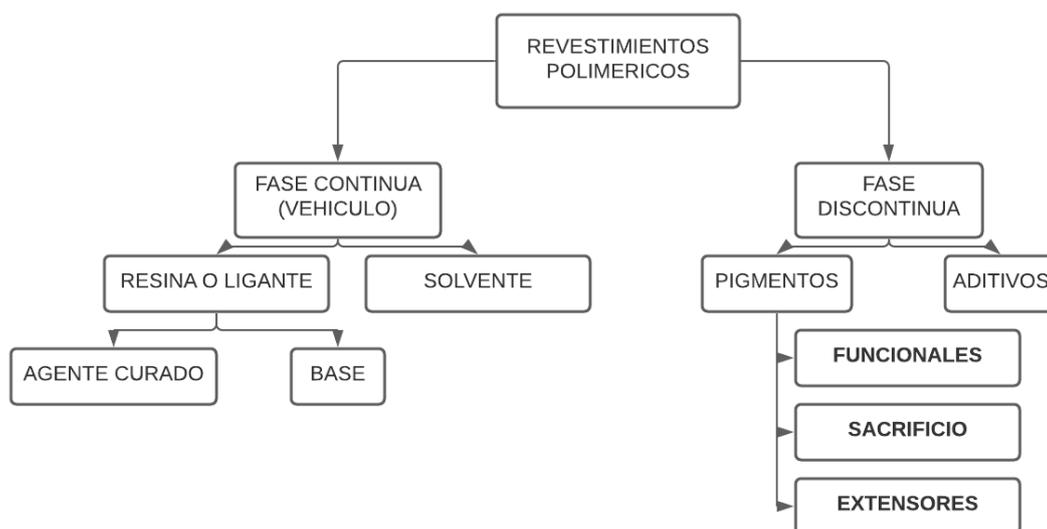


Figura 5. Componentes que conforman un revestimiento polimérico

Fuente : (Escuela politecnica Nacional, 2012)

Los revestimientos o pinturas se aplican en una sola capa cuando las tuberías se encuentran instaladas en condiciones estáticas en superficies arenosas o arcillosas. La implementación de recubrimientos orgánicos que delimitan un ambiente agresivo y la superficie del material es el método más efectuado en la protección de materiales (Montilla Parra, 2017). En múltiples

ocasiones se utilizan capas adicionales en especial en las tuberías sumergidas en agua de mar donde el ambiente es mucho más agresivo y pueda asegurar su correcto aislamiento. Las multicapas se emplean cuando el entorno donde se encuentran las líneas se considera extremo como en superficies rocosas que fácilmente pueden desgastarla (Guo et al., 2014). Las propiedades más destacables e importantes que se debe tener en cuenta en los distintos tipos de recubrimiento para tuberías submarinas son las siguientes:

- Resistencia a la absorción de agua de mar
- Resistencia a los productos químicos del agua de mar
- Resistencia al desprendimiento catódico.
- Adhesión a la superficie
- Flexibilidad
- Resistencia al impacto y a la abrasión
- compatibilidad con la CP

4.3.1.1 Recubrimiento de epoxi unido por fusión (FBE)

Son utilizados con mayor frecuencia para las tuberías de transporte de crudo y gas a gran profundidad debido a su rentabilidad, facilidad de reparar, fácil aplicación, alta adherencia, y soporta las temperaturas de transporte de las sustancias.

4.3.1.2 Sistema dual FBE / PP

Este tipo de protección son las más utilizadas actualmente en sistemas de recubrimientos anticorrosivos externos (Bray et al., 2013) consta de agregar una capa base de fusión epoxilica fundida (FBE, fusion bounded epoxy) a una capa de polipropileno (PP), donde esta última aporta resistencia mecánica a la estructura.

4.3.2 Recubrimientos que actúan como ánodos de sacrificio y protección catódica

4.3.2.1 Recubrimientos como ánodos de sacrificio

Existen diversos tipos de recubrimientos que, con ayuda de un pigmento con alto contenido en cierto metal, como en el caso más específico, Zinc (Zn), puede actuar como un ánodo contenido en el recubrimiento que se aplica generalmente sobre los aceros. Cabe destacar que la estabilidad del Zinc en medios bastante agresivos radica en las propiedades de la capa o película que este desarrolla. La composición química de la capa protectora determina el tipo de ataque al metal y la velocidad de corrosión sobre este (Jhon Avila Piracoca, 2018).

4.3.2.2 Recubrimientos y protección catódica

La combinación de un recubrimiento, bien sea polimérico, epoxílico o pinturas, en conjunto con el mecanismo de protección catódica (CP), son implementados usualmente para controlar la corrosión de tuberías que se encuentran enterradas, donde el recubrimiento actúa como mecanismo de protección primario y la CP está presente para contrarrestar irregularidades e imperfecciones en la capa principal para compensar el efecto de la corrosión por exposición del material al medio con propiedades electrolíticas (suelo) (Jhon Avila Piracoca, 2018). Los metales que usualmente se protegen mediante esta técnica son el acero, cobre, plomo, latón, aluminio, bronce y los aceros inoxidables PEMEX, (como se citó en Jhon Avila Piracoca, 2018).

4.3.3 Protección anódica y catódica

4.3.3.1 Protección catódica (CP)

Es un tipo de protección o técnica que permite controlar o prevenir el proceso de la corrosión electroquímica en estructuras metálicas en estructuras subterráneas o sumergidas tanto en agua dulce como de mar (Bringas Rodriguez, 2015), mediante la disminución del potencial eléctrico del material provocado por una corriente directa catódica, la que se suministra mediante un sistema anódico. Este tipo de protección se realiza comúnmente en sistemas como los que se presentan a continuación:

- Instalaciones subterráneas (oleoductos, gaseoductos, acueductos, tanques)
- Estructuras marinas expuestas (puertos, plataformas marinas, cascos de barcos)

- Internos de intercambiadores de calor o equipos que a menudo están en contacto con agua de mar
- Estructuras de hormigón armado contaminadas con cloruro.

En este mecanismo, la corrosión se detiene cuando una corriente eléctrica fluye en sentido opuesto con igual o similar magnitud. La corriente obtenida mediante un rectificador es conocida como corriente impresa y cuando se obtiene de un ánodo de sacrificio se conoce como corriente galvánica, la que forma un tipo de pila natural entregando una cantidad de corriente necesaria para que no ocurra corrosión sobre el material (Mendez, 2016). Cabe resaltar, que el cátodo es el electrodo donde ocurre la reacción de reducción en la que no ocurre corrosión del material (Carlo César Clavijo Cáceres, 2014).

4.3.3.1.1 Protección catódica por corriente impresa.

Implica reducir la diferencia de potencial (a cero) entre los sitios anódicos y catódicos del sistema mediante la impresión de corriente hacia las tuberías por medio de un electrodo externo que polariza los sitios catódicos en dirección opuesta, provocando cero corriente de corrosión (Covarrubias Sanz, 2010).

4.3.3.2 Protección anódica

La protección anódica consiste en reducir el potencial electroquímico del metal que se desea proteger mediante la incorporación o adición de una corriente eléctrica externa que vuelve al metal más anódico induciéndolo a un estado de pasivación que protege los materiales. Se emplea un metal activo de los que los más usados son el zinc, magnesio o aluminio, y se pone en contacto eléctrico con el metal que se desea proteger, de tal forma que este metal de sacrificio actúe como un ánodo corroyéndose mientras el metal a proteger se comportará como cátodo, evitando la corrosión sobre este. Cuando se usan inhibidores de la corrosión anódica la estabilidad de las tuberías de acero mejora y evitan que ocurran agrietamientos por corrosión (Arabey et al., 2011). Algunos metales en la serie galvánica en condiciones oceánicas pueden encontrarse dos veces dependiendo de si su superficie es activa o pasiva (Mendez, 2016).

4.3.3.2.1 Superficie Pasiva

Las superficies pasivas presentan una reactividad muy baja por lo que la velocidad de corrosión en este tipo de superficies es casi insignificante (Mendez, 2016).

4.3.3.2.2 Superficie activa

En este estado, los materiales metálicos o aleaciones de este tienden a corroerse con mayor facilidad, debido a las diferencias que se presentan en el potencial electroquímico que provoca que unas regiones actúen como ánodos y otras como cátodo (Mendez, 2016). En la Tabla 4 podemos encontrar una lista de metales en una serie electroquímica y la tendencia que presentan a adoptar un carácter pasivo o activo.

Tabla 4. Serie electroquímica/galvánica de metales presentes en agua de mar

Activo o Anódico	
	Magnesio
	Aleaciones de magnesio
	zinc
	Acero galvanizado
	Aluminio 1100
	Aluminio 2024
	Acero
	Hierro dulce (forjado)
	Hierro colado (fundido)
	Acero inoxidable 13% Cr, tipo 410 (activo)
	Acero inoxidable 18 - 8, tipo 304 (activo)
	Soldaduras de plomo - estaño
	Plomo
	Estaño
	Metal Muntz
	Bronce al Manganeso
	Latón naval
	Níquel (activo)
	Aleación 76 Ni - 16 Cr - 7 Fe (activo)
	Aleación 60 Ni - 30 Mo - 6 Fe (1Mn)
	Latón amarillo
	Latón admiralty
	Latón rojo
	Cobre
	Bronce al silicio
	Cuproníquel 70 - 30
	Bronce G
	Soldadura de plata
	Níquel (pasivo)

	Aleación 76 Ni - 16 Cr - 7 Fe (pasivo)
	Acero inoxidable 18 - 8, tipo 304 (pasivo)
	Plata
	Grafito
	Oro
Noble o Catódico	Platino

Fuente: (Mendez, 2016)

4.4 MÉTODOS Y MECANISMOS DE DETECCIÓN DE LA CORROSION

4.4.1 Termografía infrarroja (TIR)

Técnica de ensayo de carácter no destructivo que permite obtener información térmica de un sistema a través de la captación de radiación infrarroja emitida por la superficie del material bien sea que se encuentre en estado estacionario o en movimiento (NEITA DUARTE & PEÑA RODRIGUEZ, 2011). Para sistemas de tuberías, esta técnica es utilizada para la detección de agua en las capas protectoras de las líneas, las que son las responsables de la corrosión en el material (Cadelano et al., 2016).

4.4.1.1 Termografía de fase pulsada (PPT)

Es una técnica que se utiliza en el procesamiento termo gráfico mediante la que, por medio de la transformada de Fourier, permite un cambio de dominio de tiempo a frecuencia.

4.4.1.2 Termografía de componentes principales (PCT)

Es una técnica que se basa en un algoritmo que analiza los principales componentes y representa la información en forma de datos donde se emplea un conjunto de vectores (Cadelano et al., 2016).

4.4.2 Reflectómetro en el dominio del tiempo (TDR)

El TDR es un método de medición no destructiva del tipo electromagnético (EM) y se utiliza para estimar el contenido de agua en suelo de manera indirecta. Esta técnica se emplea para predecir la corrosión localizando los defectos del recubrimiento utilizado en las tuberías enterradas mediante los cambios de impedancia como se observa en la Figura 6. La información

se complementa correlacionándolo con las condiciones de operación a la que se encuentra el sistema de protección catódica (Reyes, 2013).

La localización de daños en las tuberías por medio de TDR, permite una detección de la falla casi inmediata dando un factor de seguridad también en la prevención de riesgos (Orduña reyes & Tellez Garcia, 2012).



Figura 6. Detección del daño en la tubería por variación de la impedancia.

Fuente: (Reyes, 2013)

4.4.3 Técnica de inspección CIPS

La técnica de estudio de potencial de intervalo cerrado (CIPS, close interval potential survey) permite medir valores de potencial de polarización en una tubería, cada intervalo de estudio debe ser menor a 2 metros y ubica los daños que se puedan haber causado sobre el revestimiento evaluando la protección catódica y detecta cualquier tipo de interferencia que existan por efecto de las corrientes telúricas (Reyes Gonzales & Torres Roa, 2016).

4.4.4 Técnica de inspección DCVG

Este tipo de inspección se utiliza para evaluar el estado de los recubrimientos sobre una tubería, la inspección de gradiente de voltaje por corriente directa (DCVG, direct current voltaje gradient) detecta fallas cuando la tubería se encuentra en contacto con el suelo (electrolito) (Reyes Gonzales & Torres Roa, 2016).

4.4.5 Método termo gráfico

Consta de aplicar una temperatura uniforme sobre una sección de la tubería determinando zonas más calientes que otras, las zonas más calientes son efecto de fallas presentadas sobre la superficie del material como la corrosión que se asemeja a las características térmicas del agua

denotando manchas de zonas más calientes a las del material sano como se demostró en el estudio realizado por (Laaidi et al., 2011).

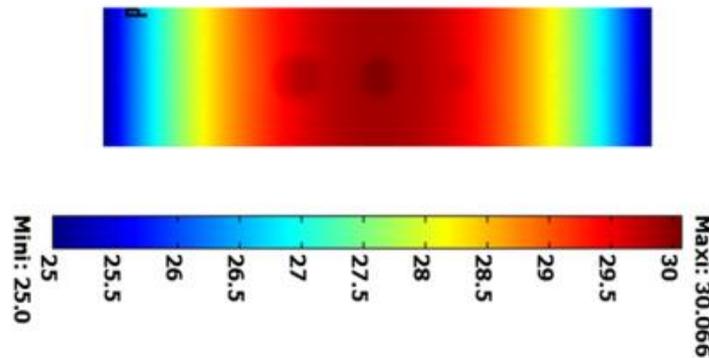


Figura 7. Esquema termo gráfico de una sección de tubería con irregularidades

Fuente: (Laaidi et al., 2011)

4.4.6 Modelo de red neuronal BP de corrosión en tuberías

En este enfoque, el modelo de red neuronal se utiliza para predecir la corrosión que se presenta en tuberías a larga distancia. Este tipo de predicción presenta mayor precisión de ajuste y predice la velocidad de corrosión de manera confiable (Ren et al., 2012).

4.4.7 Método electromagnético

Es un procedimiento EM de inspección rápida no destructiva desarrollada por (Dzhala & Verbenets', 2011) que permite evaluar la distribución de la corriente de protección catódica y el estado de los recubrimientos anticorrosivos a distintas longitudes de tuberías en condiciones subterráneas.

5. ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

La finalidad de realizar un análisis de los suelos en el sector nacional e internacional, es demostrar la presencia de metales pesados en los suelos e identificar qué factores influyen en la acumulación de estos. Según diversos estudios desarrollados en las diferentes ciudades a nivel internacional, se encontraron altas concentraciones de MP, de los que se destacan : Cd, Cr, Cu, Pb, Ni, V y Zn (Trujillo-González & Torres-Mora, 2015). De acuerdo a las pruebas y estudios realizados, se obtuvo una secuencia de concentración de metales pesados en las

distintas locaciones a nivel mundial como se muestra: Zn, Pb y Cu, siendo el Zn el más abundante (Zafra-mejía et al., 2020). Estos resultados demuestran que las características de los suelos no difieren en gran medida en las distintas localidades facilitando la comprensión y estudio de la corrosión externa bajo las mismas condiciones.

5.1.1 Análisis nacional realizado en Bogotá Colombia

Actualmente en Latinoamérica, la OPS (organización panamericana de la salud) se ha dado la tarea de tomarse en serio el aumento creciente de las poblaciones en las grandes ciudades, lo que trae consigo un incremento en la contaminación de los suelos y del medio ambiente en general. Esta contaminación trae grandes repercusiones negativas como la inestabilidad de los suelos o en el peor de los casos, adquieren altas concentraciones de metales pesados como plomo, zinc y cobre (Pb, Zn, Cu) derivados de sustancias y/o productos que lo contengan, como basura, vertimientos provenientes de distintas plantas industriales, pinturas, aceites, entre otros (Zafra-mejía et al., 2020).

El estudio local, se llevó a cabo en la ciudad de Bogotá Colombia, ya que actualmente, es una de las ciudades latino americanas con mayor densidad poblacional (DANE, 2018), en la que se evidencia, según estudios realizados (reportados en la Tabla 5), en base a la variación del tamaño de las partículas encontradas (63 μm -250 μm), niveles de concentración elevados de metales pesados presente en los suelos. Se realizaron muestras con tamaño de partícula menor a los 250 μm , las que son las fracciones que en promedio registraban mayor contenido de metales pesados (Zhao et al., 2010). El estudio se enfocó en las localidades más habitadas y transitadas de la ciudad de Bogotá y Soacha, donde se tuvieron en cuenta los factores más relevantes que pudiesen ocasionar la adsorción y absorción de metales pesados en los suelos de las zonas evaluadas como se evidencia en la Tabla 5. * I=industrial, R=residencial, RU=rural, C=comercial, Z=zona correspondiente (Zafra-mejía et al., 2020).

Tabla 5. Datos obtenidos en los ensayos a diferentes localidades de la ciudad de Bogotá y Soacha en función de la densidad poblacional, precipitación, uso del suelo y tráfico vehicular.

características	Fontibon	Barrios unidos	Kennedy	Puente aranda	Autopista sur	Soacha
	Z1	Z2	Z3	Z4	AA	SO

Coordenadas						
Precipitacion promedio anual (mm)	850	950	900	850	900	900
Concentracion promedio anual de PM ₁₀ (µg/m ³)	52,1	37,5	78,5	55,5	47,9	58,5
Densidad poblacional (habitantes/ha)	600	600	480	160	<25	600
Uso del suelo (*)	I-R	R	R-I	I-C	I-RU	R
Trafico promedio diario (vehiculos/dia)	650	1600	12300	13500	40100	2750
Composicion del trafico (%)	Carros: 93/81/77/83/62/65; camiones ligeros: 5/16/4/3/7/0; camiones sin remolque: 1/1/2/2/5/0; camiones con remolque: 0/0/0/1/7/0; buses: 1/2/17/11/10/35 4/Suave-Ádo del tra sentidoe					
Z1	estudio en Puente Aranada.					

Fuente: (Zafra-mejía et al., 2020).

5.1.1.1 Otros estudios realizados en el sector nacional en Villavicencio, Colombia

Un estudio similar se realizó en la ciudad de Villavicencio, Colombia, en la que se estudió la composición de los metales pesados que se encuentran en las infraestructuras viales por medio de polvos, se evidencian en la Tabla 6, donde las variaciones de las concentraciones están contenidas SP>SA>SB respectivamente, lo que denota, que en efecto la concentración de metales pesados va a variar en función de la zona (Trujillo-González & Torres-Mora, 2015).

Tabla 6. Concentración de metales pesados en (mg/kg) del polvo vial de tres zonas en la ciudad de Villavicencio.

sector		Pb	Ni	Zn	Cu	Cr
Anillo vial (SA)	Media	87,5	5,3	133,3	126,3	9,4
	Rango	26,4-326,2	3,0-10,41	85,6-189,6	24,9-248,1	6,14-14,0
	SD	133,5	3,2	53,5	91,5	3,0
Buque (SB)	Media	26,0	7,2	108,3	23,7	7,3
	Rango	17,5-31,7	6,5-8,9	104,4-113	13,6-40,0	4,7-10,0
	SD	4,7	0,9	4,1	9,6	1,9
Porvenir (SP)	Media	1289,4	54,3	387,6	490,2	60,2
	Rango	259,2-4079,8	20,7-123,3	222,5-511,8	36,1-903,0	27,1-115,3
	SD	1598,8	41,3	129,0	345,9	35,7

Fuente: (Trujillo-González & Torres-Mora, 2015).

Las correspondientes concentraciones de Cd en las tres zonas, no fueron reportadas debido a que en los estudios no se encontraron valores por encima de la concentración detectable. SD=desviación estándar.

5.1.2 Análisis internacionales realizados en las ciudades de México y Morelia

Centraremos el análisis internacional en la Ciudad de México, México, que es uno de los países del mundo y el país latinoamericano con mayor alto grado de crecimiento poblacional y por ende, un país con un crecimiento acelerado en la zona industrial, también teniendo en cuenta que las condiciones en las zonas urbanas son similares en todo el mundo (Zafra-mejía et al., 2020). Centrándonos en la misma situación que se planteaba en la ciudad de Bogotá, Colombia, el aumento de urbanizaciones y zonas industriales provocan un impacto negativo sobre los suelos de las grandes ciudades. Estudios realizados evaluaron la concentración de metales pesados en el suelo. Los datos reportados por el estudio, demuestran la presencia de plomo (Pb), cobre (Cu), zinc (Zn) y cadmio (Cd) (Morton-bermea, 2006). Otro estudio desarrollado en la zona urbana de Morelia, Michoacán, México, muestra las concentraciones y los tipos de metales pesados encontrados en los suelos como se evidencia en la Tabla 7 reportados mediante datos estadísticos.

Tabla 7. Estadística descriptiva de los metales pesados contenidos en los suelos con asentamiento urbano en Morelia, Michoacán, México.

parámetros	Fe (g kg ⁻¹)	Mn (g kg ⁻¹)	Li (mg kg ⁻¹)	Zn (mg kg ⁻¹)	V (mg kg ⁻¹)	Pb (mg kg ⁻¹)
N	100	100	100	99	80	74
promedio	22	0,6	11	85	33	39
mediana	22	0,6	9	66	33	21
DE	10	0,43	7	76	23	61
CV (%)	45	67	61	90	71	155
mínimo	4	0,03	1	1	1	0
máximo	57	3,64	40	373	96	430

intervalo	53	3,61	39	372	95	430
------------------	----	------	----	-----	----	-----

Fuente: (Delgado et al., 2015).

Los autores expresan que la presencia de altas concentraciones de vanadio (V), plomo (Pb) y zinc (Zn) en las zonas mixtas urbanas de la ciudad de Morelia, México, es posiblemente ocasionado por el tránsito vehicular que ocurre en esta zona, y en la que, conforma la mayoría de la urbanización y zonas industriales (Delgado et al., 2015). Basado en el estudio presentado por (Morton-bermea, 2006) la presencia de Zn y Pb se debe a la influencia humana (origen vehicular) más que la natural. En el estudio desarrollado por (Delgado et al., 2015) se encontró que los usos de suelo de área natural protegida (ANP) presentaron las concentraciones más bajas de plomo (Pb), Zinc (Zn) y manganeso (Mn), por lo que, los autores plantearon que se deberían aumentar la planeación urbana con espacios de áreas verdes.

5.2 RESULTADOS DEL ESTUDIO DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO

La resistencia que presentó el suelo estudiado, indicó que probablemente sus valores son dependientes de la humedad presente en la tierra que se conforman por capas como se evidencia en la Figura 8 y sus tipos de material (arena, grava, arcilla, materiales orgánicos y combinaciones de estos). Se consideró el suelo como no uniforme debido a que está conformado por diferentes capas. En la Tabla 8 se tabularon los datos de resistividad del suelo que se obtuvieron a lo largo del gasoducto tomados en distintos puntos bajo distintas condiciones en una distancia de 4 Km.

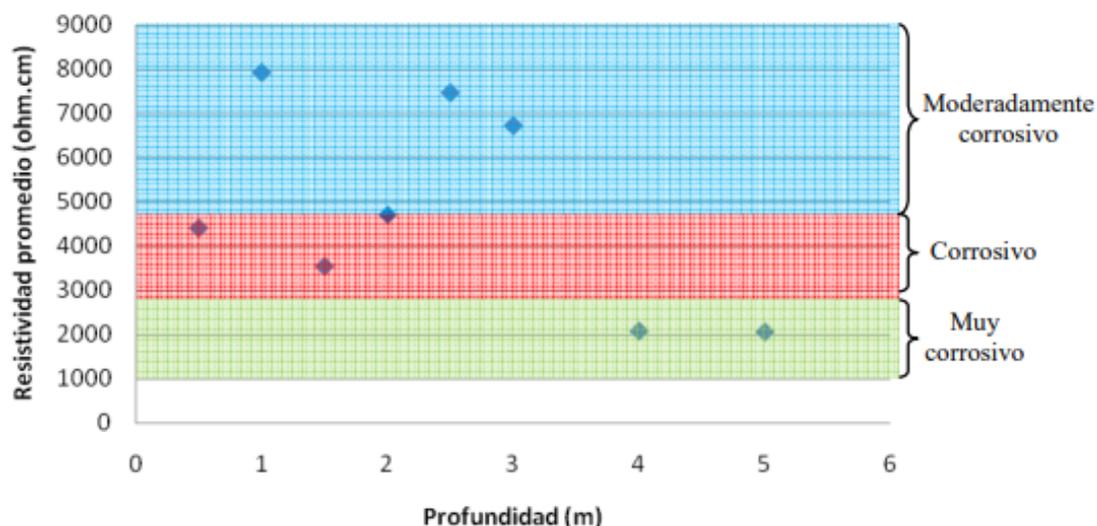


Figura 8. Resistividad del suelo a distintas profundidades.

Fuente: (Covarrubias Sanz, 2010)

También se observó la correspondiente asignación de la agresividad del suelo como se representó en la Tabla 8. Basados en los análisis de los datos obtenidos, se observó que las zonas con pastizal fueron los suelos pocos corrosivos y con los valores de potenciales menos negativos, mientras que en los terrenos bajos con alta humedad se presentó mayor corrosividad debido a que la presencia de agua ofrece menor resistencia al suelo en estas zonas y en la Tabla 9, también se muestran los valores de pH medidos en cada punto del estudio.

Tabla 8. Resistividad (ρ) del suelo obtenidos en distintos puntos del gasoducto.

Valores medidos de resistividad de suelo			
Puntos (km)	Resistividad ρ (Ω.cm)	Observaciones del tipo de terreno	Corrosividad del suelo basada al valor de ρ
0,000	3,806	Terreno húmedo, zona baja	Corrosivo
0,500	6,704	Zona con vegetación pastizal	Poco corrosivo
1,000	6,480	Zona con vegetación pastizal	Poco corrosivo
1,500	3,648	Terreno húmedo, zona baja	Corrosivo
2,000	8,991	Zona con vegetación pastizal	Poco corrosivo
2,500	7,892	Zona con vegetación pastizal	Poco corrosivo
3,000	5,988	Zona con vegetación pastizal	Poco corrosivo
3,500	3,896	Terreno húmedo, zona baja	Corrosivo
4,000	3,862	Terreno húmedo, zona Baja	Corrosivo

Fuente: (Angel & Veleva, 2017)

Tabla 9. Valores de pH obtenidos en las zonas de estudio.

Puntos (km)	pH
0,000	4,62
0,500	4,68
1,000	4,71
1,500	4,92
2,000	5,03
2,500	4,75
3,000	5,12

3,500	4,97
4,000	4,61

5.3 RESULTADOS DE LA EVALUACION DE LA CORROSION EXTERNA EN TUBERIAS SUBTERRANEAS DE UN ACUEDUCTO

Los autores estudiaron las posibles fuentes de metales pesados que se encontraban en los ambientes agresivos y evaluaron el grado de corrosión presentada en la capa externa de las tuberías de agua. Se tuvieron en cuenta las propiedades de interés del suelo como: pH, humedad, temperatura, resistividad, porosidad, potencial de oxidación-reducción (ORP), iones (cloruro y sulfato), carbono total (TC), nitrógeno total (TN), y presencia microbiana (Ganiyu et al., 2018). Los resultados de los análisis demuestran que las propiedades más influyentes para determinar el grado de corrosión externa en las tuberías son: pH del suelo, resistividad y el contenido de humedad del suelo como también expresó (Angel & Veleva, 2017) en su estudio sobre la determinación de la resistividad de los suelos. Los resultados obtenidos se evidencian en la Tabla 11 (anexos). El estudio demostró que el grado de corrosión varía de “altamente corrosivo” a “levemente corrosivo” de acuerdo a los valores de potencial redox (ORP) < 400Mv obtenidos en las muestras e indicaron que el entorno era propicio para los microbios presentes en el suelo (con gran cantidad de bacterias SRB) que forman bio-películas que aumentan la velocidad de corrosión de las tuberías.

5.4 RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ESTUDIO DE CORRIENTES PARASITAS EN TUBERIAS PARALELAS DE UN GASODUCTO.

Debido a las necesidades industriales, actualmente se emplean tuberías que se encuentran ubicadas de forma paralela y cada una de estas líneas poseen una CP independiente debido a que se construyen en distintos lapsos de tiempo, (Yang et al., 2019) en su estudio encontró el efecto que tiene las distancia entre las tuberías paralelas como se evidencia en la Figura 9.

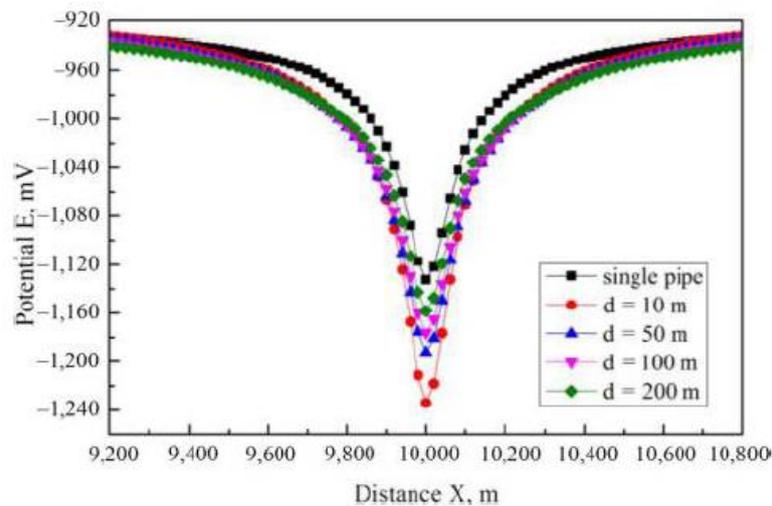


Figura 9. Distribución potencial de las líneas de un oleoducto a distintas separaciones.

Fuente: (Yang et al., 2019).

Se pudo observar según los resultados obtenidos por (Yang et al., 2019), que a medida que la distancia horizontal entre líneas disminuye, decrece el potencial del ánodo lo que conlleva a un aumento de la corrosión en las tuberías por efecto de la interferencia. En otro estudio realizado por (Xu et al., 2019) se observó que a medida que la corriente parasita aumentaba la velocidad de corrosión también lo hacía.

5.5 CORROSION EFECTUADA POR BACTERIAS SULFATOREDUCTORAS EN DIFERENTES TIPOS DE METALES DE APLICACIÓN INGENIERIL

En el estudio se llevó a cabo el análisis y observación de la cuantificación de la corrosión provocada por bacterias (bio-corrosión) en distintos tipos de metales como se observa en la Figura 10, en un reactor anaerobio con un medio de cultivo ATCC 1627 enriquecido con extracto de levadura simulando las condiciones de operación (pH, temperatura, nutrientes, etc.) similares a las que se encuentra el campo de estudio (suelo). El ensayo se realizó en un intervalo de tiempo de 15 días.

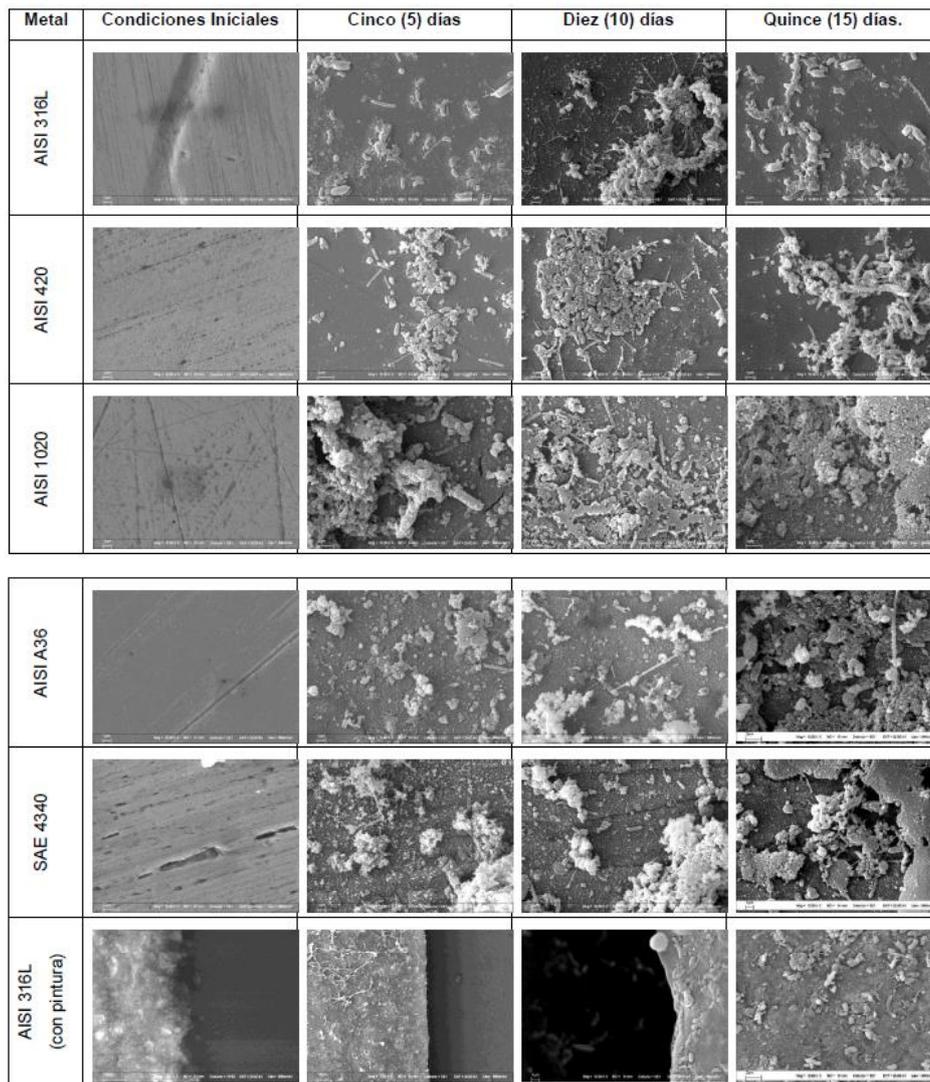


Figura 10. Ensayos realizados para distintos tipos de metales de aplicación ingenieril en presencia de bacterias sulfato reductoras en un reactor anaerobio.

Fuente: (Santander Morales, 2008)

Según el seguimiento realizado en tres lapsos de tiempo distintos (5, 10, 15 días) se observó un comportamiento creciente (exceptuando el acero 316 L, el que presentó una repentina disminución), inicialmente en las zonas que presentaban ralladuras o surcos formando agregaciones de bacterias y productos de la corrosión. La Tabla 10 muestra el porcentaje de área cubierto a los 5, 10 y 15 días, donde se evidencia que el metal con mayor afectación es la muestra de acero 1020 (Russi et al., n.d.).

Tabla 10. Porcentaje de área cubierta.

Fuente: (Santander Morales, 2008)

	AISI 316L	AISI 420	AISI 1020	AISI A36	SAE 4340
0 días	0	0	0	0	0
5 días	36,8%	23,1%	37,2%	3,8%	22,1%
10 días	23,7%	28,5%	41,6%	16,3%	34,5%
15 días	17,1%	32,8%	56,0%	56,2%	48,9%

Se observó que el potencial de corrosión creció en los primeros días y luego tendió a estabilizarse, esto podría ser consecuencia de la formación de una bio-película y productos de corrosión sobre la superficie en la muestra (Russi et al., n.d.).

5.5.1 Afectación de la capa de pintura anticorrosiva que recubre la tubería

En la Figura 11 se observa cómo después de 10 días de exposición en el bio-reactor la capa de pintura anticorrosiva se deteriora y expone al acero completamente. En base a este estudio se determinó que los microorganismos presentes en los suelos ayudan al proceso de corrosión en las tuberías inclusive si estas cuentan con pinturas epóxicas como recubrimiento.

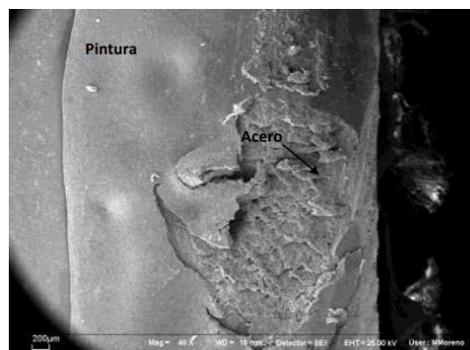


Figura 11. Superficie anticorrosiva después de 10 días de incubación en el bio-reactor (zoom: x48)

Fuente: (Santander Morales, 2008)

5.6 CORROSION LOCALIZADA POR PICADURA DEL ACERO AUTENTICO 316L POR EFECTO DE LA TEMPERATURA EN SOLUCION SALINA.

Se estudió la rapidez de corrosión presentada en acero austenítico 316L en medio salino a temperaturas de 30°C, 45°C y 60 °C, respectivamente. Se determinó que la rapidez de corrosión

sobre este material aumentaba al aumentar la temperatura como se observa en la Figura 12 debido a que la densidad de corriente también presentó un aumento con esta y se pudo observar mediante el método de extrapolación de Tafel. Los resultados obtenidos en el estudio realizado por (Rodriguez et al., 2013) demuestran que a estas condiciones el material en medio salino sufrió un proceso de corrosión localizada por picaduras como se evidencia en la Figura x, siendo notable la penetración y la profundidad sobre el material.

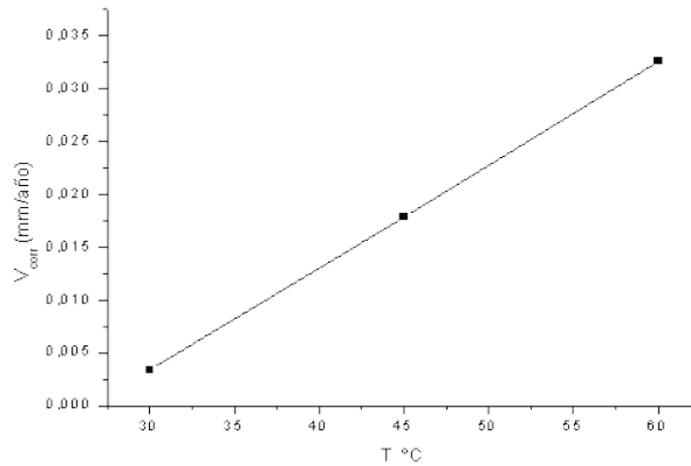


Figura 12. Efecto de la temperatura sobre la rapidez de corrosión del Acero inoxidable austenítico 316 L en medio salino

Fuente: (Rodriguez et al., 2013)

Se comprobó que a medida que aumenta la rapidez de corrosión también se incrementa el ataque localizado en la superficie del material por acción del aumento de la temperatura.

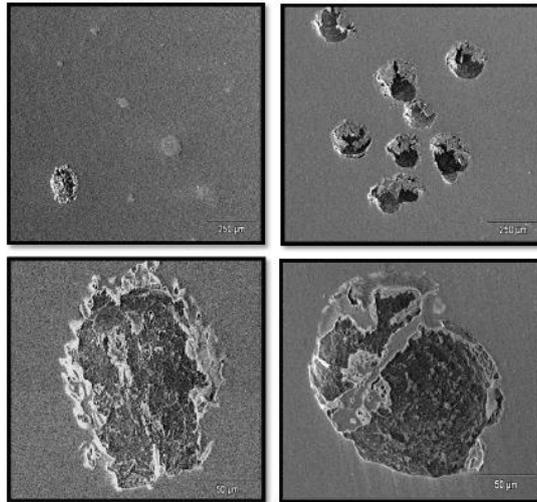


Figura 13. Micrografía del acero inoxidable austenítico 316L expuesta a ensayos electroquímicos a 45 y 60 °C. (magnificación superior 100X. Magnificación inferior 600X).

Fuente: (Rodriguez et al., 2013)

Se evidenció que la temperatura es el factor más influyente sobre la corrosión general y localizada de este material en medio salino. No se evidenció corrosión por picaduras a 30°C.

5.7 CORROSION BAJO PRESION INDUCIDA E HIDRAULICA DE TUBERIAS SUBMARINAS

El estudio se realizó a diferentes profundidades para establecer el efecto de la presión sobre la integridad de la tubería en condiciones submarinas como se evidencia en la Figura 14. No se encontró una variación de la presión de falla de la corrosión interna y externa y se determinó que la presión de falla disminuía directamente con el aumento de la profundidad ilustrado en el apartado (a) de la Figura 14.

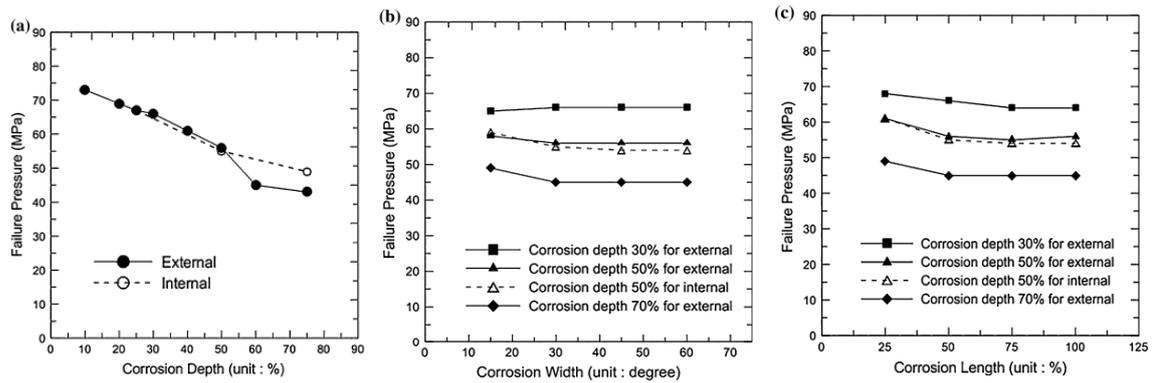


Figura 14. Relación entre la presión de falla y la de corrosión a (a) una profundidad, (b) a lo ancho, (c) a lo largo

Fuente: (Choi et al., 2016)

Otra observación resaltada por los autores (Choi et al., 2016), fue la consideración del espesor de la pared como el parámetro más sensible en el estudio, de tal forma que para garantizar una seguridad suficiente en el funcionamiento o una necesidad de mantenimiento, se debe evaluar el grosor adecuado de la pared.

5.8 ACERCA DE LOS MÉTODOS DE PROTECCION

- Un análisis mediante pruebas electroquímicas realizado por (Montilla Parra, 2017) determinó que la velocidad de corrosión depende del tipo de recubrimiento que se usa sobre la tubería, en este caso se empleó un recubrimiento anticorrosivo y otro epóxico bituminoso, determinando que el primero presentó mejores características de protección.
- Se debe tener en cuenta que sin importar el tipo de recubrimiento que se use, si este presenta defectos y la protección catódica no trabaja adecuadamente, se producen zonas catódicas entre el recubrimiento y la tubería provocando el desprendimiento de esta.
- Una de las técnicas más económicas y que presentaron mejor protección a las estructuras submarinas según (Mendez, 2016), fue la protección catódica por ánodos de sacrificio, éstos no deben tener capas de recubrimiento en su superficie ya que pierde área de contacto y por tanto funcionalidad.

- En la industria del gas y de petróleo se emplean diversos tipos de recubrimiento generalmente de tipo polimérico, en la Figura 16 (anexos) se detalla los tipos de protección que se emplean en diversos campos. En la Figura 14 se muestran los tipos de recubrimiento más empleados a lo largo del tiempo destacando actualmente las multicapas de diversos componentes que dan mayor resistencia y mejoras en las propiedades anticorrosivas.

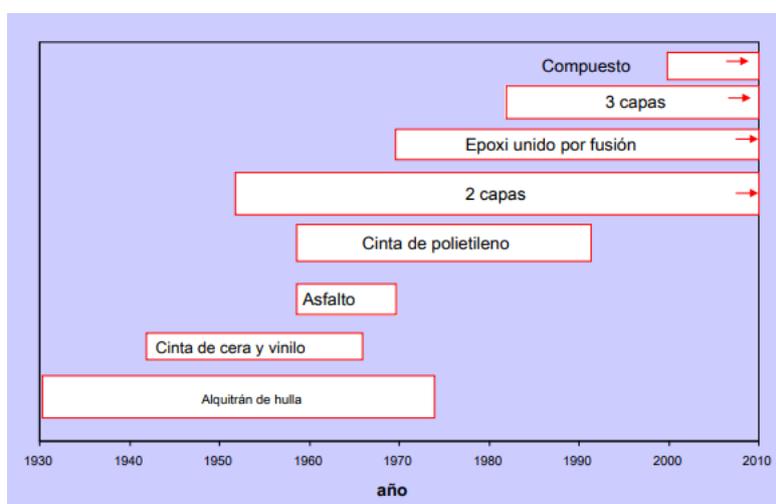


Figura 15. Recubrimientos empleados por la industria del gas y de petróleo a lo largo del tiempo

Fuente: (Papavinasam, 2014)

- La protección catódica de corriente impresa es un método ideal para la protección de las tuberías ante los problemas que presentan los sulfuros, debido a que posee un rango amplio de protección potencial y posee una corriente de salida controlable con costos bajos. Este método se puede aplicar en diferentes materiales que constituyen los oleoductos y los gasoductos (Bray et al., 2013).

CONCLUSIONES

Se encontró que la corrosión externa en tuberías subterráneas está presente en todo tipo de materiales de aplicación ingenieril, desde tuberías para el transporte en un gasoducto y oleoducto, hasta el suministro de una planta de agua potable. Las características del suelo más influyentes en la corrosión externa que se encontraron en los diversos estudios son: La humedad, capaz de transportar y diluir sustancias como las sales, los metales pesados que pueden provocar corrosión galvánica cuando entran en contacto con la superficie de la estructura, el pH, la acidez, las sales disueltas, dentro las que se destacan los sulfatos que se reducen a sulfuros siendo perjudiciales para la integridad del material debido a su alta solubilidad y transporte, interferencias eléctricas que producen corrosión por corrientes parasitas, la temperatura, que al localizarse en distintos tramos de la tubería, provocará que se forme la corrosión electroquímica donde una zona más caliente actuará como ánodo y otra más fría como cátodo, y la más relevante, la resistividad del suelo, responsable directa de la velocidad de corrosión que se da en las tuberías enterradas. Otro factor importante estudiado, es la presencia de bacterias sulfato reductoras que en las condiciones adecuadas (Temperatura y nutrientes) pueden causar daños severos no sólo en la superficie metálica sino también en las capas protectoras provocando la exposición y corrosión de las tuberías enterradas.

En cuanto a las condiciones del agua de mar, la corrosión en los lineamientos de transporte de gas y crudo ocurren por las altas concentraciones de sales disueltas (especialmente los iones Cl^-), gradientes de temperatura entre las corrientes oceánicas, oxígeno disuelto, acidez, conductividad y el pH, que a pesar que las distintas formas del carbono como los carbonatos presentes en esta, actúan como amortiguadores de pH. El tipo de corrosión que más se presenta en condiciones submarinas, es la corrosión localizada o por picaduras, que, en contacto con el medio agresivo del océano ocurre una reacción anódica sobre el metal donde la picadura se comporta como ánodo y el material no expuesto actuara como cátodo.

Existen diversos métodos y tipos de recubrimientos que pueden ser aplicados para aislar la superficie de las tuberías al medio electrolítico (mar o suelo). Los estudios más recientes revelan que la protección en tuberías enterradas más empleada en los procesos industriales es la protección catódica por corriente impresa, ya que este permite disminuir el potencial eléctrico a prácticamente cero, evitando que ocurra la corrosión electroquímica sobre el

material. En condiciones submarinas, se emplean mayoritariamente recubrimientos de tipo polimérico, anticorrosivos o pinturas epóxicas de una sola capa, aunque algunos estudios mostraron que actualmente se emplean técnicas de protección mediante multicapas generalmente compuestas por FBE Y PP extruido, o también, empleando una protección catódica por ánodos de sacrificio.

Como conclusión final y en base a la revisión bibliográfica, se observó que la corrosión es un fenómeno que es prácticamente imposible de evitar, tan solo podemos ralentizar el proceso con el que ocurre mediante técnicas de recubrimiento, protección y sistemas de detección temprana que permitan evaluar y seguir estudiando los mecanismos de reacción y mitigación de la corrosión externa ocurrida en tuberías enterradas y sumergidas.

6. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

El campo y estudio de la corrosión es amplio, actualmente se siguen investigando sobre técnicas de protección y detección de la corrosión en tuberías enterradas y sumergidas. Para futuros trabajos se analizarán las nuevas tecnologías aplicadas a la protección y detección de la corrosión en las tuberías de los oleoductos, gasoductos y acueductos. Estudiar a detalle los tipos de recubrimiento y determinar sus propiedades físicas, químicas y mecánicas y determinar cuál presenta condiciones óptimas y brinda la mejor condición de trabajo en condiciones agresivas. Se debe profundizar en los tipos de inhibidores tanto orgánicos como inorgánicos empleados actualmente en la industria para mitigar la corrosión externa en tuberías. Estudiar a fondo la influencia de los metales pesados sobre la corrosión externa y que metales presentes en el suelo generan mayor impacto. Finalmente, se recomienda complementar el documento con información de interés nueva o faltante que sean pertinentes para el estudio y enriquezca el camino al conocimiento de las generaciones próximas.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albeitar, P. V. (2013). *Parámetros fisicoquímicos del agua*. 1–4.
- Alberto, J., Domínguez, D., & Rodríguez, R. A. (2014). *Deterioro experimentado por un oleoducto magistral*. *V(3)*, 55–63.
- Angel, E. Del, & Veleva, L. (2017). *Artículo Regular (ASAP) EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA DE UN GASODUCTO ENTERRADO ASSESSMENT CORROSIVITY SOILS ALONG A PIPELINE BURIED WITH A CATHODIC PROTECTION SY ... Artículo Regular (ASAP). November 2016.*
- Arabey, A. B., Bogdanov, R. I., Ignatenko, V. E., Nenasheva, T. A., & Marshakov, A. I. (2011). Effect of corrosion medium composition on rate of crack growth in X70 pipeline steel. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, *47(2)*, 236–245. <https://doi.org/10.1134/S2070205111020031>
- Bray, J. D., Rodriguez-Marek, A., & Gillie, J. L. (2013). Corrosion problems during oil and gas production and its mitigation. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, *42(1)*, 1–8. <https://doi.org/10.5459/bnzsee.42.1.1-8>
- Bringas Rodriguez, V. C. (2015). *EVALUACIÓN DEL DESPRENDIMIENTO CATÓDICO DE TRES TIPOS DE RECUBRIMIENTOS ORGÁNICOS: EPOXICO, ZINCROMATO Y BITUMINOSO APLICADOS EN TUBERÍAS SUMERGIDAS EN UN MEDIO MARINO SIMULADO PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA*. 1–143.
- Cadelano, G., Bortolin, A., Ferrarini, G., Molinas, B., Giantin, D., Zonta, P., & Bison, P. (2016). Corrosion Detection in Pipelines Using Infrared Thermography: Experiments and Data Processing Methods. *Journal of Nondestructive Evaluation*, *35(3)*, 1–11. <https://doi.org/10.1007/s10921-016-0365-5>
- Carlo César Clavijo Cáceres. (2014). *Sistemas de protección catódica para tuberías enterradas de transmisión de gas natural*.
- Choi, K. H., Lee, C. S., Ryu, D. M., Koo, B. Y., Kim, M. H., & Lee, J. M. (2016). Comparison of computational and analytical methods for evaluation of failure pressure of subsea pipelines containing internal and external corrossions. *Journal of Marine Science and Technology (Japan)*, *21(3)*, 369–384. <https://doi.org/10.1007/s00773-015-0359-5>

- Cornejo-ortega, J. L. (2015). *TEMAS SOBRE INVESTIGACIONES COSTERAS* (Issue September). <https://doi.org/10.13140/2.1.3655.7128>
- Covarrubias Sanz, E. E. (2010). *Estudio de la potencialidad corrosiva del suelo de las plantas de polietileno de alta y baja densidad*. <http://159.90.80.55/tesis/000148745.pdf>
- Cui, G., Li, Z. L., Yang, C., & Wang, M. (2016). The influence of DC stray current on pipeline corrosion. *Petroleum Science*, *13*(1), 135–145. <https://doi.org/10.1007/s12182-015-0064-3>
- DANE. (2018). Censo Nacional de Población y censo nacional de vivienda Vivienda. *DANE, Publicacion Para Todos*, 66. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivenda-2018/cuantos-somos>
- Delgado, C., Israde, I., Bautista, F., A., G., Márquez, C., Cejudo, R., Morales, J., & González, I. (2015). Metales pesados en suelos urbanos de Morelia, Michoacán: influencia del uso del suelo y del tipo de vialidad. *Ciencia Nicolaita*, *65*, 120–138. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Dzhala, R. M., & Verbenets', B. Y. (2011). Electromagnetic method and procedures of nondestructive inspection of the corrosion protection of underground pipelines. *Materials Science*, *47*(2), 245–254. <https://doi.org/10.1007/s11003-011-9387-4>
- ECCA. (2011). *The Basics of Corrosion Technical paper Contents Introduction*.
- Escuela politecnica Nacional. (2012). Corrosión y degradación de los metales. *Bibdigital.Epn.Edu.Ec*, 294. <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/2771/1/CD-0553.pdf>
- Gadala, I. M., Abdel Wahab, M., & Alfantazi, A. (2016). Numerical simulations of soil physicochemistry and aeration influences on the external corrosion and cathodic protection design of buried pipeline steels. *Materials and Design*, *97*, 287–299. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.02.089>
- Ganiyu, S. A., Olurin, O. T., Ajibodu, K. A., Badmus, B. S., & Ajayi, A. O. (2018). Assessment of the degree of external corrosion of buried water pipelines and source identification of heavy metals due to surrounding soil conditions in humid environment. *Environmental Earth Sciences*, *77*(12), 1–18. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7611-3>
- Gomes, W. J. S., Beck, A. T., & Haukaas, T. (2013). Optimal inspection planning for onshore pipelines subject to external corrosion. *Reliability Engineering and System Safety*, *118*, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2013.04.011>
- Gonzales Boza, M. A., & Cruz Castro, J. F. (2017). *034DISENODEL SISTEMA DE*

PROTECCION CATODICA POR CORRIENTE IMPRESA EN TUBERIAS ENTERRADAS PARA LA PLANTA DE ALMACENAMIENTO DE HIDROCARBUROS TERMINAL CHIMBOTE DE PETROPERU.

- Guo, B., Song, S., Ghalambor, A., & Lin, T. R. (2014). Pipeline External Corrosion Protection. *Offshore Pipelines*, 103–112. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-397949-0.00008-x>
- jhon avila piracoca. (2018). evaluacion de recubrimientos comerciales. *Высшей Нервной Деятельности*, 2, 227–249.
- Laaidi, N., Belattar, S., & Elbaloutti, A. (2011). Pipeline corrosion, modeling and analysis. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 30(3), 158–163. <https://doi.org/10.1007/s10921-011-0103-y>
- Lahiri, A. K. (2017). Applied Metallurgy and Corrosion Control. In *Applied Metallurgy and Corrosion Control* (Issue i). <https://doi.org/10.1007/978-981-10-4684-1>
- Lee, G. H., Pouraria, H., Seo, J. K., & Paik, J. K. (2015). Burst strength behaviour of an aging subsea gas pipeline elbow in different external and internal corrosion-damaged positions. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 7(3), 435–451. <https://doi.org/10.1515/ijnaoe-2015-0031>
- Mendez, adonay. (2016). *PROTECCION CATODICA : Ánodos de Sacrificio*. 1–41.
- Monroy Cruz, Y. Y. (2014). Bacterias sulfato reductoras. *Universidad Militar de Nueva Grana, Bogotá*, 28. <http://unimilitar-dspace.metabiblioteca.org/bitstream/10654/12039/1/BSR - SEMINARIO DE INVESTIGACION.pdf>
- Montilla Parra, D. A. (2017). *SIMULACIÓN DEL FENÓMENO DE CORROSIÓN EXTERNA Y PROTECCIÓN CATÓDICA EN UNA TUBERIA PROTOTIPO UTILIZADA PARA EL TRANSPORTE DE CRUDO EN SISTEMAS SUBMARINOS APLICANDO LA HERRAMIENTA COMSOL MULTIPHYSICS*. 6, 5–9.
- Morton-bermea, O. (2006). *CONTENIDO DE METALES PESADOS EN SUELOS SUPERFICIALES DE LA CIUDAD DE MÉXICO*. 6–8.
- NEITA DUARTE, L. Y., & PEÑA RODRIGUEZ, E. O. (2011). *PRINCIPIOS BÁSICOS DE LA TERMOGRAFÍA INFRARROJA Y SU UTILIZACIÓN COMO TÉCNICA PARA MANTENIMIENTO PREDICTIVO LIDIA*.
- Orduña reyes, E., & Tellez Garcia, R. (2012). *New Sensor Cable for the Detection and Location of Leaks in Pipelines for Transportation of Hydrocarbons*. 585–589.
- Papavinasam, S. (2014). Mitigation – External Corrosion. In *Corrosion Control in the Oil and Gas Industry*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-397022-0.00009-1>
- PEMEX. (2001). *Anticorrosivos Para Tuberias Enterradas Y / O Sumergidas*.

- Pierre R, R. (2008). 59. Corrosion Engineering Principles and Practice, McGraw-Hill, New York, US. In *McGraw-Hill, New York, US*. <https://doi.org/10.1177/0340035206070163>
- Ren, C. Y., Qiao, W., & Tian, X. (2012). Natural gas pipeline corrosion rate prediction model based on BP neural network. *Advances in Intelligent and Soft Computing*, 147 AISC, 449–455. https://doi.org/10.1007/978-3-642-28592-9_47
- Reyes, E. O. (2013). *Monitoreo y control de daño en ductos enterrados utilizando TDR*.
- Reyes Gonzales, L., & Torres Roa, J. (2016). EVALUACIÓN DEL ESTADO DE CORROSIÓN EXTERNA DE UN GASODUCTO UBICADO AL OCCIDENTE DE COLOMBIA, USANDO TÉCNICAS CIPS Y DCVG. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Rodriguez, C., Figueroa, Y., & Prin, J. (2013). Efecto De La Temperatura En El Comportamiento Del Acero Inoxidable Austenítico 316L Frente a La Corrosión Electroquímica. *SABER. Revista Multidisciplinaria Del Consejo de Investigación de La Universidad de Oriente*, 25(3), 302–308.
- Rodriguez Remigio, D. M. (2019). EVALUACION DE LA APLICACION DE RECUBRIMIENTOS EPOXI Y POLIURETANO ALIFATICO PARA LA INHIBICION DE LA CORROSION EN LAS VIOLAS DE TUBERIAS FORZADAS DE LA HIDROELECTRICA. *Universidad Nacional "José*.
- Russi, P., Pianzola, M. J., Menes, J., Corengia, M., Díaz, V., & Ohanian, M. (n.d.). *Influencia microbiológica sobre la corrosión: ensayos sobre materiales de interés tecnológico realizados en la Bahía de Montevideo*.
- Salazar-Jiménez, J. A. (2015). Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales (Nota técnica). *Revista Tecnología En Marcha*, 28(3), 127. <https://doi.org/10.18845/tm.v28i3.2417>
- Salinas, Q. C. (2010). Conceptos básicos de la corrosión. *Ingenio Libre*, 202. <http://www.unilibre.edu.co/revistaingeniolibre/revista5/articulos/Conceptos-basicos-de-la-corrosion-2.pdf>
- Santander Morales, B. C. (2008). *ESTUDIO EXPERIMENTAL DE CORROSIÓN EN METALES DE USO INDUSTRIAL POR Desulfovibrio desulfuricans*.
- Sardi, L. (2009). *Calidad Del Agua Domiciliaria. Experiencia De Aprendizaje En El Transcurso De Un Proyecto De Investigación: Aplicación Del Método Científico*. 1–10. https://www.palermo.edu/ingenieria/PDFs/GIIS/TRABAJO_COINI_LOPEZSARDI.pdf
- Trujillo-González, J. M., & Torres-Mora, M. A. (2015). Evaluación De Metales Pesados Acumulados En Polvo Vial En Tres Sectores De La Ciudad De Villavicencio, Colombia.

Luna Azul, 41, 296–308. <https://doi.org/10.17151/luaz.2015.41.16>

Valenzuela, L. C. (2014). *La Química del Agua*.

Wang, H., Yajima, A., Liang, R. Y., & Castaneda, H. (2015). A clustering approach for assessing external corrosion in a buried pipeline based on hidden Markov random field model. *Structural Safety*, 56, 18–29. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2015.05.002>

Xu, F., Wu, H., Hu, X., & Wang, Z. C. (2019). Experimental Study on the Corrosion of Buried Pipeline in Coastal Area Under the Interference of Stray Current. *Transactions on Electrical and Electronic Materials*, 20(5), 431–436. <https://doi.org/10.1007/s42341-019-00122-w>

Yang, Z., Cui, G., Li, Z., & Liu, J. G. (2019). Study on the interference between parallel pipelines and optimized operation for the cathodic protection systems. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 66(2), 195–202. <https://doi.org/10.1108/ACMM-07-2018-1977>

Zafra-mejía, C., Beltrán-vargas, J., & Hernández-peña, Y. (2020). *Contaminación y salud pública en hábitats urbanos : metales pesados en sedimentos viales de Bogotá , Colombia* *Pollution And Public Health In Urban Habitats : Heavy Metals In Road Sediments Of Bogota , Colombia* *contaminação e saúde pública em habitats urba. 1*, 1–16.

Zhao, H., Li, X., Wang, X., & Tian, D. (2010). Grain size distribution of road-deposited sediment and its contribution to heavy metal pollution in urban runoff in Beijing, China. *Journal of Hazardous Materials*, 183(1–3), 203–210. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.07.012>

Zujur, D. C., & Rosales, A. (2012). *CORROSIÓN POR CORRIENTES PARÁSITAS DE UN TANQUE DE LIMPIEZA ELECTROLÍTICA*. 2011(1), 24–28.

8. ANEXOS

Tabla 11. Resultados de las propiedades analizadas y metales pesados en las muestras de suelo

	pH (H ₂ O)	TC (%)	TN (%)	Cu (mg / kg)	Fe (mg / kg)	Zn (mg / kg)	Mn (mg / kg)	Arena (%)
1	6.10	0,37	0,05	2,29	54,18	2,70	42,93	70,60
2	6.17	0,80	0,05	2,54	81,07	3,04	85,92	62,60
3	5.91	0,67	0,05	4.10	64,09	1,46	88,68	68,60
4.4	5.96	0,61	0,06	2,99	64,62	2,06	121,63	69,60
5.5	6,92	1,32	0,12	2,96	141,13	2,18	67,23	64,60
6.6	5.91	0,84	0,06	2,92	85,03	1,75	79,10	62,60
7.7	6,96	1,28	0,07	3,02	101,10	1,42	45,44	66,60
8	7.73	5.08	0,33	9,77	114,32	3.72	101,92	68,60
9.9	6.24	0,87	0,07	3.24	102,65	1,90	62,89	70,60
10	6.27	0,45	0,05	2,79	96,50	2,38	109,91	69,60
11	6.39	0,63	0,05	4.78	118,70	3,01	143,31	61,60
12	6.10	0,43	0,04	2,25	75,00	2,36	59,15	64,60

SSN	Arcilla (%)	Limo (%)	Porosidad (%)	Contenido de humedad (%)	Resistividad del suelo (ohm-cm)	Potencial redox (mV)	Cl ⁻ (mg / kg)	ENTONCES Ca ²⁺ (mg / kg)
1	11,56	17,84	53,46	21,61	5,24	97,56	9,81	19,38
2	13,56	23,84	45,57	23,20	4,85	98,55	9,82	19,60
3	13,56	17,84	45,57	27,15	4,86	94,52	8,26	15,81
4.4	11,56	18,84	53,33	23,20	5,22	95,31	8,33	16,08
5.5	15,56	19,84	39,71	25,57	4,28	110,55	11,26	25,21
6.6	13,56	23,84	45,57	22,40	4,82	94,46	8,38	16,03
7.7	15,56	17,84	39,71	26,36	4,34	111,28	11,38	25,64
8	13,56	17,84	45,57	27,15	4,21	123,55	12,20	30,52
9.9	11,56	17,84	53,42	21,89	5,31	99,76	9,92	20,04
10	11,56	18,84	53,45	23,42	5,25	100,17	10,01	20,31
11	13,56	24,84	45,57	23,49	4,83	102,10	10,31	21,32
12	14,56	20,84	42,44	21,61	5,62	97,46	9,78	19,30

Table 9.1 External Coatings Used in Various Oil and Gas Sectors

Sector	Component	Type of External Coatings	Unique Reasons
Production	Drill Pipe	<ul style="list-style-type: none"> • Usually not used 	<ul style="list-style-type: none"> • Concrete coatings are used in downhole tubular to prevent collapse of pipeline. • Insulators are used in <i>in situ</i> production pipeline to maintain higher temperature. • Insulators are used in offshore production pipelines to avoid hydrate formation. • Thermal spray coatings are used in offshore pipeline to provide cathodic protection. • Girthweld coatings are applied in the field after the line pipes are welded together.
	Casing Pipe	<ul style="list-style-type: none"> • Usually not used 	
	Downhole Tubular	<ul style="list-style-type: none"> • Polymeric • Concrete 	
	Acidizing Pipe	<ul style="list-style-type: none"> • Polymeric • Concrete 	
	Water Generators	<ul style="list-style-type: none"> • Polymeric 	
	Gas Generators	<ul style="list-style-type: none"> • Polymeric 	
	Open mining	<ul style="list-style-type: none"> • Not applicable 	
	<i>In situ</i> Production	<ul style="list-style-type: none"> • Polymeric • Insulators 	
	Wellhead	<ul style="list-style-type: none"> • Polymeric 	
	Pipelines	<ul style="list-style-type: none"> • Polymeric • Insulators • Thermal spray • Girthweld 	
	Heavy Crude Oil Pipelines	<ul style="list-style-type: none"> • Polymeric • Insulators • Girthweld 	
	Hydrotransportation Pipelines	<ul style="list-style-type: none"> • Polymeric • Girthweld 	
	Separators	<ul style="list-style-type: none"> • Polymeric 	
	Gas Dehydration Facilities	<ul style="list-style-type: none"> • Polymeric 	
Recovery Centers (Extraction)	<ul style="list-style-type: none"> • Polymeric 		
Upgraders	<ul style="list-style-type: none"> • Polymeric • Insulators 		
Waste Water Pipelines	<ul style="list-style-type: none"> • Polymeric • Girthweld 		
Tailing Pipelines	<ul style="list-style-type: none"> • Polymeric • Girthweld 		
Lease Tanks	<ul style="list-style-type: none"> • Polymeric 		

Sector	Component	Type of External Coatings	Unique Reasons
Transmission-pipelines	Transmission Pipelines (Midstream Pipelines)	<ul style="list-style-type: none"> • Polymeric • Girthweld 	
	Compressor Stations	<ul style="list-style-type: none"> • Polymeric 	
	Pump Stations	<ul style="list-style-type: none"> • Polymeric 	
	Pipeline Accessories	<ul style="list-style-type: none"> • Polymeric 	
Transportation-Tankers	Ships	<ul style="list-style-type: none"> • Polymeric 	
	LNG Tanks	<ul style="list-style-type: none"> • Polymeric • Insulators 	
	Railcars	<ul style="list-style-type: none"> • Polymeric 	
Storage	Other modes	<ul style="list-style-type: none"> • Polymeric 	
	Gas Storage	N/A	
Refining	Oil Storage	<ul style="list-style-type: none"> • Polymeric 	
	Refineries	<ul style="list-style-type: none"> • Polymeric • Insulators 	
Distribution	Product Pipelines	<ul style="list-style-type: none"> • Polymeric • Girthweld 	
	Terminals	<ul style="list-style-type: none"> • Polymeric 	
	City Gates and Local Distribution	<ul style="list-style-type: none"> • Polymeric • Girthweld 	
	CNG Tanks	<ul style="list-style-type: none"> • Polymeric 	
Special	Diluent Pipelines	<ul style="list-style-type: none"> • Polymeric • Girthweld 	
	CO ₂ Pipelines	<ul style="list-style-type: none"> • Polymeric • Girthweld 	
	Biofuel Infrastructure	<ul style="list-style-type: none"> • Polymeric • Girthweld 	
	High Vapor Pressure Pipelines	<ul style="list-style-type: none"> • Polymeric • Girthweld 	
	Hydrogen Pipelines	<ul style="list-style-type: none"> • Polymeric • Girthweld 	

Figura 16. Recubrimientos externos que se emplean en el sector de petróleo y gas.