



**UNIVERSIDAD ESTATAL DE MILAGRO**

**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

**TRABAJO FINAL PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE MAGISTER EN  
MATEMÁTICAS, MENCIÓN MODELACIÓN MATEMÁTICA.**

**Tema:**

**Optimización de la vida útil de cubiertas y láminas metálicas a través de la aplicación de recubrimientos galvanizados: Un enfoque basado en modelos predictivos de velocidad de corrosión atmosférica.**

**AUTOR:**

Ing. Leonardo Rogelio Paladines Zurita

**DIRECTOR TFM:**

Ing. Fabricio Guevara Viejó, Ph.D.

**Milagro, agosto de 2023  
ECUADOR**

## ACEPTACIÓN DEL TUTOR

Por la presente hago constar que he analizado el proyecto de informe de investigación presentado por el Ing. Leonardo Rogelio Paladines Zurita con el tema *“Optimización de la vida útil de cubiertas y láminas metálicas a través de la aplicación de recubrimientos galvanizados: Un enfoque basado en modelos predictivos de velocidad de corrosión atmosférica.”*, para optar al título de Magister en Matemática, mención en Modelación Matemática y que acepto tutoriar al estudiante, durante la etapa de desarrollo del trabajo hasta su presentación, evaluación y sustentación.

Milagro, 12 de marzo de 2023.

Ing. Fabricio Guevara Viejó, Ph.D.

Cédula: 0917882961

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

El autor de esta investigación declara ante el Comité Académico del Programa de Maestría en Matemática de la Universidad Estatal de Milagro, que el trabajo presentado es de mi propia autoría, no contiene material escrito de otra persona, salvo el que está referenciado debidamente en el texto; parte del presente documento o en su totalidad no ha sido aceptado para el otorgamiento de cualquier otro Título de una institución nacional o extranjera.

Milagro, 12 de marzo de 2023

Ing. Leonardo Rogelio Paladines Zurita

Cédula: 0925587230

# CERTIFICACIÓN DE LA DEFENSA



## VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO DIRECCIÓN DE POSGRADO CERTIFICACIÓN DE LA DEFENSA

El TRIBUNAL CALIFICADOR, previo a la obtención del título de **MAGÍSTER EN MATEMÁTICA CON MENCIÓN EN MODELACIÓN MATEMÁTICA**, presentado por **ING. PALADINES ZURITA LEONARDO ROGELIO**, otorga al presente proyecto de Investigación denominado **"OPTIMIZACIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE CUBIERTAS Y LÁMINAS METÁLICAS A TRAVÉS DE LA APLICACIÓN DE RECUBRIMIENTOS GALVANIZADOS: UN ENFOQUE BASADO EN MODELOS PREDICTIVOS DE VELOCIDAD DE CORROSIÓN ATMOSFÉRICA."**, las siguientes calificaciones:

TRABAJO DE TITULACION	60.00
DEFENSA ORAL	40.00
PROMEDIO	100.00
EQUIVALENTE	Exoelente



MBA. BASURTO QUILLIGANA ROBERTO IVAN  
PRESIDENTE/A DEL TRIBUNAL



Mgtl. LAZO SULCA RAFAEL SELEYMAN  
VOCAL



Ph.D. VALENZUELA COBOS JUAN DIEGO  
SECRETARÍA DEL TRIBUNAL

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a Dios a mis Padres y Hermanos, quienes han sido mi mayor inspiración y apoyo incondicional a lo largo de mi vida académica. Su paciencia y aliento constante han sido fundamentales en mi camino hacia la culminación este trabajo. También quiero dedicar este logro a mis seres queridos, quienes han estado a mi lado brindándome su amor y empuje en cada paso del camino. Agradezco profundamente su confianza y motivación, este trabajo representa un pequeño reflejo de mi gratitud hacia todos ellos.

Ing. Leonardo Rogelio Paladines Zurita

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que han contribuido de alguna manera a la realización mi trabajo de graduación. A mi asesor, por su guía experta y apoyo constante a lo largo de este proceso de investigación. Agradezco también a mis profesores y compañeros de clase, cuyos conocimientos y perspectivas enriquecieron mi trabajo. Agradezco gentilmente a mi familia y amigos por su amor, comprensión y aliento incondicional. Su apoyo fue fundamental para superar los desafíos y alcanzar este logro académico. A todos ustedes, ¡mi más profundo agradecimiento!

Ing. Leonardo Rogelio Paladines Zurita

## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Ing. Fabricio Guevara Viejó, Ph.D.

Rector de la Universidad Estatal de Milagro

Presente.

Mediante el presente documento, libre y voluntariamente procedo a hacer entrega de la Cesión de Derechos de Autor del Trabajo realizado como requisito previo a la obtención de mi Título de Cuarto Nivel cuyo tema fue **“Optimización de la vida útil de cubiertas y láminas metálicas a través de la aplicación de recubrimientos galvanizados: Un enfoque basado en modelos predictivos de velocidad de corrosión atmosférica.”** y que corresponde al Vicerrectorado de Investigación y Postgrado.

Milagro, 5 de junio de 2023

Ing. Leonardo Rogelio Paladines Zurita

Cédula: 0925587230

## Tabla de Contenido

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....	III
CERTIFICACIÓN DE LA DEFENSA .....	IV
DEDICATORIA.....	V
AGRADECIMIENTO.....	VI
CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR.....	VII
RESUMEN .....	XV
ABSTRACT .....	XVI
CAPÍTULO I .....	1
1.    Introducción.....	1
1.1.    Situación problemática.....	3
1.2.    Formulación del problema.....	4
1.3.    Ambiente corrosivo de la ciudad de Guayaquil.....	5
1.4.    Impacto económico de la corrosión.....	6
1.5.    Objetivo general y objetivos específicos.....	7
1.6.    Planteamiento hipotético.....	7
CAPÍTULO II .....	9
2.    Marco Teórico.....	9
2.1.    Antecedes de la investigación.....	9
2.2.    Bases Teóricas.....	10
2.3.    Reacción de oxidación.....	11
2.4.    Reacción de reducción.....	12
2.5.    Electrodo estándar de potencial de media celda para metales.....	12
2.6.    Factores ambientales y sus efectos sobre la corrosión.....	15
2.7.    Sistema electroquímico de la corrosión atmosférica: .....	16
2.8.    Velocidad de la corrosión uniforme.....	17



2.9.	Grados de óxido.....	18
2.10.	Tipos de atmósfera.....	21
2.11.	Factores ambientales según la condición atmosférica de la región.....	22
2.12.	Efectos de la humedad relativa y la contaminación del aire sobre la corrosión atmosférica de materiales. ....	22
2.13.	Teoría de la corrosión atmosférica. ....	23
2.14.	Modelo tipo GILDES.....	26
2.15.	Efectos de corrosión atmosférica para diferentes materiales. ....	27
2.16.	Variables prácticas de importancia de la corrosión atmosférica. ....	28
2.17.	Otros contaminantes atmosféricos. ....	29
2.18.	Termodinámica de la corrosión. ....	30
2.19.	Modelos matemáticos generalizados para análisis de la velocidad de corrosión. ....	31
2.20.	Fundamentos matemáticos y físicos para el modelo cinemático de la velocidad de corrosión. ....	38
CAPÍTULO III .....		41
3.	Metodología.....	41
3.1.	Materiales y Métodos. ....	41
3.2.	Programa en Matlab para analizar los modelos de velocidad de corrosión. 44	
3.3.	Análisis gráfico de los modelos. ....	45
3.4.	Análisis económico.....	48
CAPÍTULO IV .....		54
4.	Análisis y Resultados .....	54
CAPÍTULO V.....		57
5.	Conclusiones y Recomendaciones.....	57
5.1.	Conclusiones.....	57
5.2.	Recomendaciones.....	58

6. Referencias bibliográficas.....	60
7. ANEXOS.....	62

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1.</b> Potencial estándar en el cátodo de los metales.....	13
<b>Tabla 2.</b> Tipos de atmosferas y velocidades de deposición.....	23
<b>Tabla 3.</b> Corrosión atmosférica en diferentes materiales.....	27
<b>Tabla 4.</b> Modelos matemáticos de la corrosión.....	41
<b>Tabla 5.</b> Localidades costeras con información de las variables de corrosión.....	42
<b>Tabla 6.</b> Lista de precios de planchas metálicas disponibles en el mercado. ....	48
<b>Tabla 7.</b> Dimensiones, espesores y costo para el galvanizado de planchas. ....	48
<b>Tabla 8.</b> Análisis de la Velocidad de corrosión. ....	50
<b>Tabla 9.</b> Cálculo de la vida útil de la plancha metálica.....	51
<b>Tabla 10.</b> Vida útil de las planchas metálica con galvanizado para diferentes espesores.....	52
<b>Tabla 11.</b> Resumen del análisis de costos y ahorro con galvanizado.....	53

## Índice de Figuras

<b>Figura 1.</b> Placa de zinc en solución diluida de ácido clorhídrico.....	11
<b>Figura 2.</b> Vc calculado M1 Vc experimental. ....	45
<b>Figura 3.</b> Vc calculado M2 Vc experimental. ....	46
<b>Figura 4.</b> Vc calculado M3 Vc experimental. ....	46
<b>Figura 5.</b> Vc calculado M4 Vc experimental. ....	47
<b>Figura 6.</b> Vc calculado M5 Vc experimental. ....	47
<b>Figura 7.</b> Vista superior del galpón.....	49
<b>Figura 8.</b> Vista lateral del galpón. ....	49
<b>Figura 9.</b> Bodegas de almacenaje ubicadas en la vía a Daule.....	62
<b>Figura 10.</b> Cubiertas corroídas por el paso del tiempo.....	62
<b>Figura 11.</b> Norma INEN para la aplicación de anticorrosivos en superficies metálicas. .....	63
<b>Figura 12.</b> Ficha técnica de cubiertas metálicas.....	64
<b>Figura 13.</b> Manual de galvanizado en caliente. ....	65

## Glosario de Términos

***V<sub>c</sub>***: Velocidad de corrosión.

***m***: masa.

***A***: área.

***t***: tiempo.

***V***: volumen.

***ρ***: densidad.

***x = e***: espesor.

***T***: temperatura (en °C).

***HR***: humedad relativa (en %).

***TDH***: tiempo de humedad.

***SO<sub>2</sub>***: concentración de dióxido de sulfuro en mg /m<sup>2</sup>.dia.

***Cl<sup>-</sup>***: concentración del ion cloro en mg /m<sup>2</sup>.dia.

***P***: precipitación anual en mm.

***a***: valor inicial del primer año.

***a(t)***: aceleración en función del tiempo.

***n***: inverso del nivel de protección de la capa de óxido.

***k***: constante de proporcionalidad que depende del sistema corrosivo y las propiedades del material.

***E***: potencial aplicado al material.

***E<sub>corr</sub>***: potencial de corrosión, representa el potencial al cual ocurre la corrosión.

**[*C*]**: concentración de la especie corrosiva.

***B***: constante relacionada con la cinética de la reacción corrosiva.

***E<sub>a</sub>***: energía de activación para la reacción corrosiva.

***R***: constante de los gases ideales.

***T<sub>abs</sub>***: temperatura en escala absoluta.

***E***: potencial de electrodo.

***C***: concentración de especies corrosivas en función del tiempo (*t*) y la posición (*x*).

***ΔG***: cambio de energía libre de Gibbs.

***D***: coeficiente de difusión que representa la capacidad de las especies corrosivas para difundir en el medio.

***v(t)***: velocidad en función del tiempo.

***x(t)***: posición en función del tiempo.

***v = f(x)***: velocidad en función de la posición.

***a = f(x)***: aceleración en función de la posición.

## RESUMEN

La corrosión atmosférica es un problema común que afecta a las cubiertas metálicas expuestas, especialmente en entornos costeros. Esta investigación se enfoca en el estudio del galvanizado como una técnica eficaz para prolongar la vida útil de estas cubiertas y prevenir la corrosión atmosférica.

El objetivo principal de este estudio fue evaluar los beneficios del galvanizado en la protección contra la corrosión atmosférica y proporcionar recomendaciones prácticas para su implementación. Se realizaron experimentos en localidades costeras del Ecuador como parte de una investigación en curso llevada a cabo por una universidad del país para estudiar la corrosión a gran escala.

Los resultados obtenidos demostraron que el galvanizado ofrece una excelente protección contra la corrosión atmosférica en comparación con las cubiertas metálicas no galvanizadas. La capa de zinc aplicada durante el proceso de galvanizado actúa como una barrera protectora, evitando el contacto directo del metal base con el entorno corrosivo.

Se realizó un análisis de costos y beneficios para evaluar la viabilidad económica del galvanizado como método de prolongación de la vida útil de las cubiertas metálicas. Los resultados indicaron que, a largo plazo, el galvanizado es una inversión rentable, ya que reduce los costos de mantenimiento y reemplazo de las cubiertas afectadas por la corrosión.

El galvanizado se identifica como una técnica efectiva para prolongar la vida útil de las cubiertas metálicas, protegiéndolas de la corrosión atmosférica. Esta investigación proporciona evidencia científica y práctica que respalda la implementación del galvanizado como una estrategia de prevención y mantenimiento para la conservación de las cubiertas metálicas expuestas en entornos corrosivos. El uso de esta técnica puede generar ahorros significativos a largo plazo y contribuir a la sostenibilidad y durabilidad de las construcciones. Además, se presentan valores de ahorro actualizados, demostrando que esta técnica puede ser aplicada independientemente del momento en que se implemente.

**Palabras Clave:** corrosión, galvanizado, velocidad, espesor, factibilidad, prevención.

## ABSTRACT

Atmospheric corrosion is a common issue that affects exposed metal roofs in various construction projects, particularly in coastal environments. This thesis focuses on studying galvanization as an effective technique to prolong the lifespan of metal roofs and prevent atmospheric corrosion.

The primary objective of this research was to evaluate the advantages of galvanization in protecting against atmospheric corrosion and provide practical recommendations for its implementation. The experimental data supporting this research were collected in coastal areas of Ecuador. This information forms part of an ongoing study conducted by a university in the country, aiming to investigate corrosion in-depth.

The obtained results demonstrated that galvanization offers excellent protection against atmospheric corrosion when compared to non-galvanized metal roofs. The zinc coating applied during the galvanization process acts as a protective barrier, effectively preventing direct contact between the base metal and the corrosive environment.

A cost-benefit analysis was conducted to assess the economic viability of galvanization as a method to extend the lifespan of metal roofs. The results indicated that galvanization is a cost-effective long-term investment, as it reduces maintenance and replacement costs associated with roofs affected by corrosion.

Galvanization is identified as an effective technique to prolong the lifespan of metal roofs, safeguarding them against atmospheric corrosion. This research provides scientific and practical evidence that supports the implementation of galvanization as a preventive and maintenance strategy for preserving metal roofs exposed to corrosive environments. By employing this technique, significant long-term savings can be achieved, thereby contributing to the sustainability and durability of constructions. Finally, savings values are presented, demonstrating the feasibility of implementing galvanization regardless of the timeframe for implementation.

**Keywords:** corrosion, galvanization, velocity, thickness, feasibility, prevention.



# CAPÍTULO I

## 1. Introducción

A lo largo de la historia, el ser humano ha utilizado los minerales que le proporciona la naturaleza para satisfacer sus necesidades en muchas áreas del desarrollo humano. En la naturaleza, los minerales existen cuando se combinan con otros elementos, formando compuestos como óxidos, sulfuros, hidróxidos, porque se presentan en una forma termodinámicamente más estable.

Las aleaciones metálicas expuestas al medio ambiente son susceptibles a la corrosión atmosférica en diversos grados según los contaminantes presentes. Una forma de mitigar este efecto es utilizar sistemas de doble revestimiento a base de zinc y diferentes metales (conocido como galvanizado) para brindar protección anódica al metal expuesto. Este tipo de recubrimientos se utilizan en diversos componentes industriales, en torres de transmisión de energía, antenas, estructuras metálicas, edificios, techos, etc., alargando su vida útil.

Sin embargo, las condiciones atmosféricas no son constantes y pueden variar según la ubicación geográfica y, en particular, por los efectos del cambio climático reciente, lo que lleva a una disminución del rendimiento de estos sistemas de protección que conduce a una aceleración de la erosión. Un parámetro muy importante para poder realizar la resistencia al desgaste es conocer la tasa de desgaste del material. La tasa de desgaste depende del material y de las condiciones en las que se expone o incluso de la fatiga en la que se sumerge. Existen modelos predictivos en la literatura que ayudan a determinar el grado de agresión corrosiva en entornos industriales, urbanos o rurales. Estos modelos se basan en datos atmosféricos y mediciones de contaminantes en el medio ambiente. Si el grado de desgaste es demasiado alto, es necesario utilizar un espesor de recubrimiento mayor para asegurar la vida útil de las piezas expuestas a estas condiciones, el nivel de desgaste en la atmósfera debe conocerse de antemano para la selección. Requisito de tiempo de protección para cualquier componente galvanizado expuesto a estas condiciones.

Las pérdidas económicas debidas a la corrosión se pueden clasificar en directas e indirectas. Las estructuras, equipos, maquinaria o componentes pueden volverse inoperables debido a la corrosión. Las pérdidas indirectas son difíciles de evaluar, pero sin duda son pérdidas debidas a la interrupción de la producción, la pérdida de

productos, las pérdidas de productos contaminados, la pérdida de productividad, el desgaste accidental en gran escala. El primer estudio riguroso para evaluar las pérdidas económicas de la erosión fue el Informe HOAR, que estimó en 1971 que los costos directos generados cada año por la erosión ascendían a alrededor del 3,5% del PIB de un país, más ahorros de entre 20 y 25% podrían lograrse utilizando la tecnología de control de corrosión actual. Cabe señalar que esta es una estimación de los costos directos, por lo que incluir los costos indirectos aumentaría el número exponencialmente. Durante las II Jornadas Nacionales de Corrosión y Protección, celebradas en Zaragoza.

En 1976, las pérdidas anuales en España se estimaban en unos 750 millones de dólares, de las que una elevada proporción corresponde a la erosión de las zonas rurales y especialmente a las influencias atmosféricas. Teniendo en cuenta los datos de PIB y ahorro potencial, las conclusiones del informe HOAR aplicable a España estiman las pérdidas del año 2000 en 12 millones de dólares (Reyes, Durán, y Castro 2015).

En el presente capítulo se detalla la situación problemática, los objetivos, alcance y limitaciones de la investigación.

En el capítulo 2. Se describen los fundamentos básicos de la corrosión y corrosión atmosférica específicamente. Se plantea el modelo básico para el análisis de la velocidad de corrosión atmosférica que nos permitirá seleccionar la mejor opción para el recubrimiento del material y de esta manera disminuir la velocidad de corrosión.

En el capítulo 3. Se estudia a detalle con los parámetros definidos, aplicados a la corrosión atmosférica y mediante del cálculo de la velocidad de corrosión mediante un modelo matemático. Se seleccionará el mejor recubrimiento galvanizado para el material.

En el capítulo 4. Se muestran los resultados del modelo matemático en el cálculo de la velocidad de corrosión. Se define algunas recomendaciones a considerar dependiendo del material y atmosfera expuesta para una mejor elección del material de recubrimiento para proteger al material de la corrosión. Se realiza un estudio económico para un caso particular.

### 1.1. **Situación problemática.**

La corrosión implica el proceso de deterioro de los materiales metálicos a través de reacciones químicas y electroquímicas, ya que buscan alcanzar un estado de energía potencial más bajo. La corrosión tiene impactos económicos, de seguridad y de preservación de materiales, por lo que es importante estudiarla y minimizarla. Este documento proporciona información sobre diferentes formas comunes de corrosión, factores que influyen en el proceso y velocidad de corrosión, así como varios métodos de control y protección contra la corrosión.

Se puede reducir la tendencia del material a corroerse mediante la aplicación de capas protectoras en su superficie. Estas capas pueden ser aplicadas artificialmente, como pintura, o pueden formarse naturalmente a través de la pasivación, creando capas de óxidos metálicos que inhiben el avance del proceso de corrosión. Para proteger el material, se sumerge en un baño de metal recubierto con un potencial electroquímico más alto.

La corrosión atmosférica causa pérdidas económicas significativas, especialmente en el sector industrial. Según estudios, se estima que más de la mitad de los daños por corrosión a nivel mundial son causados por efectos atmosféricos en materiales metálicos, principalmente en equipos y estructuras metálicas expuestas. La clasificación de la corrosión atmosférica es importante, ya que proporciona información fundamental para diseñar medidas efectivas de protección contra la corrosión. El hierro y el acero son los metales más utilizados en ingeniería debido a su versatilidad y bajo costo, pero presentan una baja resistencia a la corrosión, incluso en condiciones ambientales moderadas, lo que requiere recubrimientos protectores o tratamientos especiales.

La mayoría de los tipos de corrosión ocurren en la atmósfera. Esto se debe a que en la corrosión de metales no hay tanto electrolito como en otros tipos de corrosión electroquímica, lo que dificulta determinar la diferencia de potencial o la dirección de polarización. Sin embargo, todos los elementos electroquímicos importantes (ánodo, cátodo, electrolito) están presentes en la corrosión atmosférica. La corrosión galvánica es el resultado de corrientes generadas cuando el metal activo en el ánodo sufre corrosión, aunque la corrosión en el cátodo del metal activo depende de la difusión de oxígeno en su superficie. El potencial de un metal o aleación está

influenciado por la composición química del medio, la presencia de películas de óxido, los productos de corrosión que pueden formarse en la superficie del metal y la temperatura. Uno de los métodos más utilizados para proteger los metales es el recubrimiento, como el recubrimiento de zinc en el acero galvanizado, que proporciona una barrera continua para aislar el acero del electrolito.

## **1.2. Formulación del problema.**

El ambiente costero de Ecuador plantea desafíos significativos en términos de la corrosión atmosférica de los techados metálicos. La proximidad al mar, las corrientes marinas frías y la alta humedad favorecen la formación de agua condensada en las superficies expuestas, lo cual, junto con la salinidad del aire marino, crea un entorno corrosivo agresivo para los techados metálicos.

Adicionalmente, la presencia de salinidad en el aire, transportada por el viento marino desde el océano, aumenta la concentración de cloruros en el ambiente. Los cloruros son altamente corrosivos para los metales, ya que facilitan la entrada de iones corrosivos a través de la película pasivante que protege a los metales.

Otro factor a considerar es la contaminación atmosférica en el ambiente costero. En las zonas urbanas cercanas a la costa, las emisiones industriales y vehiculares contribuyen a la presencia de gases corrosivos, como dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno. Estos gases, combinados con la humedad y la salinidad del aire, aceleran el proceso de corrosión de los techados metálicos.

El tipo de material utilizado en los techados también influye en su susceptibilidad a la corrosión. Aunque el acero galvanizado es considerado resistente a la corrosión, la exposición continua a las condiciones adversas del ambiente costero puede dañar la capa de zinc protectora y permitir la corrosión del acero subyacente. Por otro lado, el aluminio, que es más resistente a la corrosión, puede sufrir la formación de picaduras y corrosión localizada en presencia de cloruros.

Para proteger los techados metálicos en el ambiente costero de Ecuador, es importante implementar medidas adecuadas de prevención y mantenimiento. Esto implica aplicar recubrimientos protectores, como pinturas y recubrimientos

anticorrosivos, que actúen como barrera física entre el metal y el ambiente corrosivo. Además, es esencial realizar inspecciones regulares y mantener un programa de mantenimiento preventivo para detectar y abordar cualquier daño o corrosión incipiente.

El ambiente costero del Ecuador plantea desafíos significativos en cuanto a la corrosión atmosférica de los techados metálicos. La alta humedad, la salinidad del aire, la presencia de cloruros y la contaminación atmosférica son factores que contribuyen a la corrosión acelerada. Sin embargo, mediante la implementación de medidas adecuadas de prevención y mantenimiento, es posible proteger y prolongar la vida útil de los techados.

### **1.3. Ambiente corrosivo de la ciudad de Guayaquil.**

Uno de los principales factores que afectan la corrosión en Guayaquil es la alta humedad. Debido a su ubicación costera, la ciudad está expuesta a una humedad ambiental constante, especialmente durante la estación lluviosa. La humedad relativa en Guayaquil tiende a ser elevada, lo que favorece la formación de condensación en las superficies metálicas y proporciona un ambiente propicio para la corrosión.

Además, la presencia de salinidad en el aire es un factor importante en la corrosión de los metales en Guayaquil. La brisa marina transporta partículas de sal desde el océano, y estas partículas se depositan sobre las estructuras expuestas, aumentando la concentración de cloruros en el ambiente. Los cloruros son altamente corrosivos para los metales y pueden acelerar el proceso de corrosión, especialmente en presencia de humedad.

La contaminación atmosférica también contribuye a la corrosión de los metales en Guayaquil. Si bien la ciudad ha tomado medidas para mejorar la calidad del aire en los últimos años, la presencia de gases y partículas contaminantes sigue siendo una preocupación. Los óxidos de azufre y nitrógeno, generados por las emisiones de vehículos y la actividad industrial, pueden combinarse con la humedad y la salinidad en el aire para formar ácidos corrosivos que atacan los metales expuestos.

#### 1.4. Impacto económico de la corrosión.

El análisis económico de la corrosión de metales es una herramienta importante para comprender el impacto financiero que este fenómeno tiene en diferentes industrias y sectores. La corrosión de metales es un problema común en numerosos contextos, desde la infraestructura y la construcción hasta la industria manufacturera y el transporte. A continuación, se presentan algunos aspectos clave del análisis económico de la corrosión de metales:

1. **Costos directos:** Los costos directos de la corrosión de metales incluyen los gastos asociados con el reemplazo o reparación de los componentes afectados. Estos costos pueden ser significativos, ya que la corrosión puede dañar y debilitar las estructuras metálicas, lo que requiere intervenciones costosas para mantener su funcionalidad y seguridad.
2. **Costos indirectos:** Además de los costos directos, la corrosión también genera costos indirectos. Estos pueden incluir pérdidas de productividad debido a la interrupción de las operaciones, mayores costos de mantenimiento y reparación, pérdida de eficiencia energética, disminución de la vida útil de los activos y deterioro de la calidad de los productos y servicios ofrecidos.
3. **Sectores afectados:** La corrosión de metales afecta a una amplia gama de sectores, como la industria petroquímica, el transporte marítimo, la generación de energía, la construcción, la automoción, entre otros. Cada uno de estos sectores enfrenta desafíos específicos en términos de corrosión, y los costos asociados varían en función de la importancia y el impacto de la corrosión en sus respectivas operaciones.
4. **Estrategias de mitigación:** El análisis económico de la corrosión de metales también evalúa las estrategias de mitigación disponibles y su impacto en los costos. Estas estrategias pueden incluir el uso de recubrimientos protectores, la selección de materiales resistentes a la corrosión, la implementación de programas de mantenimiento preventivo y la adopción de tecnologías de monitoreo y control.
5. **Beneficios de la prevención:** El análisis económico destaca los beneficios de la prevención de la corrosión en términos de ahorro de costos a largo plazo. La inversión en medidas preventivas puede ayudar a reducir los gastos de

reparación y reemplazo, prolongar la vida útil de los activos y mejorar la eficiencia operativa.(Zhou et al. 2019).

## **1.5. Objetivo general y objetivos específicos.**

### **1.5.1. Objetivo general.**

Optimizar la vida útil de las cubiertas y laminas metálicas a través de un galvanizado, basado en la utilización de modelos predictivos de la velocidad de corrosión atmosférica.

### **1.5.2. Objetivos específicos.**

1. Definir la corrosión, tipos de corrosión y fundamentos básicos que se debe de tener en cuenta sobre la corrosión para un mantenimiento de la estructura.
2. Recolectar información de las variables que intervienen en la corrosión para validar en modelos de velocidad de corrosión.
3. Presentar ecuaciones de cinética de corrosión para pronosticar el comportamiento de corrosión del zinc que describen que existe una ley potencial entre la corrosión del zinc y el tiempo de exposición.
4. Presentar estudio de factibilidad económica aplicando galvanizaos es caliente para aumentar la vida útil de las planchas metálicas.

## **1.6. Planteamiento hipotético.**

### **1.6.1. Hipótesis.**

1. Es posible desarrollar un modelo matemático para optimizar el recubrimiento de techos metálicos mediante galvanizado
2. Es factible predecir la corrosión mediante modelos matemáticos y la determinación de variables ambientales.
3. Mediante la aplicación adecuada de modelos matemáticos de la corrosión existentes se puede determinar la velocidad de corrosión presente en el material de techado.
4. Se supone que los cambios de la velocidad de corrosión en las planchas son constantes.

### **1.6.2. Interrogantes de la investigación.**

1. ¿Cuál es el modelo matemático adecuado para el análisis de la velocidad de corrosión en el ambiente objeto de este estudio?
2. ¿Cuáles son los parámetros que permiten optimizar el recubrimiento de los materiales de techado?
3. ¿Cuáles son las condiciones críticas para la corrosión de techados?
4. ¿Existe un ahorro económico importante al realizar un galvanizado para alargar la vida útil del material?



## CAPÍTULO II

### 2. Marco Teórico

#### 2.1. Antecedes de la investigación.

Antes del descubrimiento del mecanismo por el que se producía la corrosión, solo los humanos podían medir los resultados de este proceso, y aparecieron métodos analíticos y gravimétricos para evaluar el grado de degradación de los materiales metálicos. Luego, en 1905, Tavel descubrió una relación empírica entre la tecnología de la información, a partir de la cual comenzó a cerrar el telón sobre el mecanismo de corrosión, pero no fue hasta 1938 que Wagner y Trodd publicaron su artículo. reacciones y en relación con la formación de voltajes en electrodos mixtos Sentando las bases para la teoría de voltaje mixto, la hipótesis de que incluso sin asumir la presencia de ánodos y cátodos locales, las reacciones de corrosión pueden explicarse si se supone que una parte de las reacciones redox ocurren en la superficie del metal/electrolito y estas reacciones varían constantemente con la distribución del tiempo según la posición estadística.

Wagner y Traud también demostraron que, en ciertos casos, la velocidad de reacción se podía calcular mediante métodos electroquímicos y obtuvieron una buena correlación de la velocidad de corrosión a través de las curvas de polarización utilizando lo que ahora se conoce como "extrapolación de Tavel". Luego, algunos autores encontraron cierta relación entre la pendiente de la curva de polarización en el voltaje mixto y la tasa de desgaste. Pero hasta 1957, Stern y Jerry produjeron, sobre la base de ecuaciones cinéticas electroquímicas y teoría de voltaje mixto, una ecuación cuantitativamente relacionada con la pendiente de la curva de polarización en la vecindad del potencial de corrosión, introduciendo así métodos resistivos avanzados para calcular y monitorear la corrosión. tasas en la mayoría de los sistemas de metales/electrolito (Rodríguez, Hernández, y González 2003)

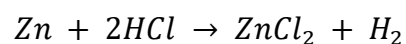
## 2.2. Bases Teóricas.

### 2.2.1. La corrosión.

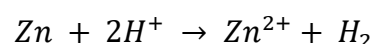
La corrosión se puede definir como el deterioro de un material debido a la acción química de su entorno. La velocidad de corrosión está influenciada por factores como la temperatura, la concentración de los reactivos y productos, así como el estrés mecánico. En general, cuando se menciona la corrosión, se hace referencia al proceso químico que afecta a los metales. Los metales son vulnerables a la corrosión debido a la presencia de electrones libres en su estructura, lo que puede generar celdas electroquímicas. La mayoría de los metales sufren cierto grado de corrosión cuando están expuestos al agua y a la atmósfera. Además, los metales pueden corroerse debido al ataque químico directo de soluciones químicas e incluso de metal en estado líquido.

En general, la corrosión es considerada un proceso destructivo en la ingeniería y puede ocasionar pérdidas económicas significativas. Por esta razón, no es sorprendente que los ingenieros de la industria estén preocupados por prevenir y controlar la corrosión. El objetivo de este capítulo es proporcionar una introducción a este tema tan importante.

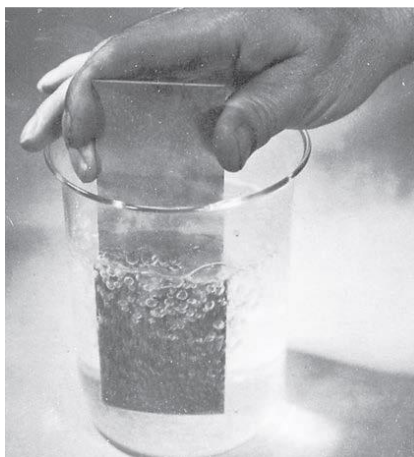
Dado que la mayoría de las reacciones de corrosión son de naturaleza electroquímica, es importante comprender los principios de las reacciones electroquímicas. Considere una pieza de zinc metálico colocada en un recipiente que contiene una solución diluida de ácido clorhídrico como se muestra en la Figura 1. El zinc se disuelve o se corroe en ácido y cloruro de zinc y produce gas hidrógeno como se muestra en la reacción química (Garces Rodriguez Roberto Carlos (UANL) 2002).



Esta reacción puede escribirse en una forma iónica simplificada, omitiendo los iones cloruro, como:

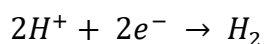
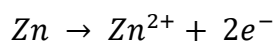


**Figura 1.** Placa de zinc en solución diluida de ácido clorhídrico



Fuente: <https://www.madrimasd.org>

Esta ecuación incluye dos semirreacciones. Estas reacciones de semicelda se pueden escribir como:



La primera ecuación química muestra cómo se oxida el zinc, la siguiente es la ecuación que describe la reducción de los iones de hidrógeno para formar hidrógeno gaseoso.

### 2.3. Reacción de oxidación.

La reacción de oxidación en la que el metal formador de iones se convierte en una solución acuosa se denomina reacción anódica, y las áreas localizadas en la superficie del metal donde se produce la reacción de oxidación se denominan ánodo local. En la reacción anódica, los electrones producidos permanecen en el metal y los átomos del metal forman un catión. (Kashani, Crewe, y Alexander 2013).

#### **2.4. Reacción de reducción.**

Una reacción de reducción en la que un metal o un no metal se reducen a una carga de equivalencia se denomina reacción catódica. Las regiones localizadas en la superficie de un metal donde los iones metálicos o los iones no metálicos pierden su carga de valencia se denominan cátodo local. En la reacción del cátodo se pierden electrones.

#### **2.5. Electrodo estándar de potencial de media celda para metales.**

En una celda electroquímica, como una celda galvánica, la base siempre es una reacción redox que se divide en dos semirreacciones: oxidación en el ánodo (pérdida de electrones) y reducción en el cátodo (recepción de electrones). La generación de electricidad se debe a la diferencia de potencial entre los potenciales específicos de dos electrodos metálicos en relación con la solución. Aunque se puede medir el potencial total de una celda, medir con precisión el potencial de un electrodo o electrolito aislado no es fácil. El potencial también varía con la temperatura, concentración y presión.

El potencial de electrodo estándar se suele representar como el potencial de reducción estándar y proporciona información sobre la semirreacción de oxidación. En cada interfaz electrodo-electrolito, los iones metálicos de la solución tienden a depositarse en el electrodo en busca de una carga positiva, mientras que los átomos de metal del electrodo tienden a disolverse en iones, liberando electrones y cargándose negativamente. Esto genera una diferencia de potencial entre el electrodo y el electrolito, conocida como potencial de electrodo.

El potencial galvánico de una celda se obtiene al combinar un par de electrodos, siendo el electrodo de hidrógeno estándar (SHE) una referencia convencional establecida en 0,00 V. Al combinar cualquier otro electrodo con el electrodo de hidrógeno estándar, se forma una celda galvánica sin marcar, permitiendo determinar el potencial de cada electrodo en relación con el SHE. Sin embargo, el voltaje de un electrodo individual no se puede determinar directamente mediante mediciones en celdas electroquímicas experimentales.

Usando este procedimiento, cualquier electrodo de voltaje desconocido se puede combinar con un electrodo de hidrógeno estándar u otro electrodo para el cual se generó el voltaje y se puede determinar este valor desconocido. (Sander et al. 2018).

En la **Tabla 1**, se detalla el potencial eléctrico para diferentes materiales respecto al potencial de hidrogeno.

*Tabla 1. Potencial estándar en el cátodo de los metales.*

<b>Cátodo (Reducción) Media-Reacción</b>	<b>Potencial Estándar E° (voltios)</b>
$\text{Li}^+(\text{aq}) + \text{e}^- \rightarrow \text{Li}(\text{s})$	-3,04
$\text{K}^+(\text{aq}) + \text{e}^- \rightarrow \text{K}(\text{s})$	-2,92
$\text{Ca}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ca}(\text{s})$	-2,76
$\text{Na}^+(\text{aq}) + \text{e}^- \rightarrow \text{Na}(\text{s})$	-2,71
$\text{Mg}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Mg}(\text{s})$	-2,38
$\text{Al}^{3+}(\text{aq}) + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Al}(\text{s})$	-1,66
$2\text{H}_2\text{O}(\text{l}) + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2(\text{g}) + 2\text{OH}^-(\text{aq})$	-0,83
$\text{Zn}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Zn}(\text{s})$	-0,76
$\text{Cr}^{3+}(\text{aq}) + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Cr}(\text{s})$	-0,74
$\text{Fe}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Fe}(\text{s})$	-0,41
$\text{Cd}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cd}(\text{s})$	-0,40
$\text{Ni}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ni}(\text{s})$	-0,23
$\text{Sn}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Sn}(\text{s})$	-0,14
$\text{Pb}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Pb}(\text{s})$	-0,13
$\text{Fe}^{3+}(\text{aq}) + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Fe}(\text{s})$	-0,04
$2\text{H}^+(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2(\text{g})$	0,00

$\text{Sn}^{4+}(\text{aq}) + 2\text{e}^{-} \rightarrow \text{Sn}^{2+}(\text{aq})$	0,15
$\text{Cu}^{2+}(\text{aq}) + \text{e}^{-} \rightarrow \text{Cu}^{+}(\text{aq})$	0,16
$\text{ClO}_4^{-}(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) + 2\text{e}^{-} \rightarrow \text{ClO}_3^{-}(\text{aq}) + 2\text{OH}^{-}(\text{aq})$	0,17
$\text{AgCl}(\text{s}) + \text{e}^{-} \rightarrow \text{Ag}(\text{s}) + \text{Cl}^{-}(\text{aq})$	0,22
$\text{Cu}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^{-} \rightarrow \text{Cu}(\text{s})$	0,34
$\text{Cu}^{+}(\text{aq}) + \text{e}^{-} \rightarrow \text{Cu}(\text{s})$	0,52
$\text{I}_2(\text{s}) + 2\text{e}^{-} \rightarrow 2\text{I}^{-}(\text{aq})$	0,54
$\text{ClO}_2^{-}(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) + 2\text{e}^{-} \rightarrow \text{ClO}^{-}(\text{aq}) + 2\text{OH}^{-}(\text{aq})$	0,59
$\text{Fe}^{3+}(\text{aq}) + \text{e}^{-} \rightarrow \text{Fe}^{2+}(\text{aq})$	0,77
$\text{Hg}_2^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^{-} \rightarrow 2\text{Hg}(\text{l})$	0,80
$\text{Ag}^{+}(\text{aq}) + \text{e}^{-} \rightarrow \text{Ag}(\text{s})$	0,80
$\text{Hg}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^{-} \rightarrow \text{Hg}(\text{l})$	0,85
$2\text{Hg}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^{-} \rightarrow \text{Hg}_2^{2+}(\text{aq})$	0,90
$\text{NO}_3^{-}(\text{aq}) + 4\text{H}^{+}(\text{aq}) + 3\text{e}^{-} \rightarrow \text{NO}(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{l})$	0,96
$\text{Br}_2(\text{l}) + 2\text{e}^{-} \rightarrow 2\text{Br}^{-}(\text{aq})$	1,07
$\text{O}_2(\text{g}) + 4\text{H}^{+}(\text{aq}) + 4\text{e}^{-} \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}(\text{l})$	1,23
$\text{Cl}_2(\text{g}) + 2\text{e}^{-} \rightarrow 2\text{Cl}^{-}(\text{aq})$	1,36
$\text{H}_2\text{O}_2(\text{aq}) + 2\text{H}^{+}(\text{aq}) + 2\text{e}^{-} \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}(\text{l})$	1,78
$\text{Co}^{3+}(\text{aq}) + \text{e}^{-} \rightarrow \text{Co}^{2+}(\text{aq})$	1,82
$\text{O}_3(\text{g}) + 2\text{H}^{+}(\text{aq}) + 2\text{e}^{-} \rightarrow \text{O}_2(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l})$	2,07
$\text{F}_2(\text{g}) + 2\text{e}^{-} \rightarrow 2\text{F}^{-}(\text{aq})$	2,87

## **2.6. Factores ambientales y sus efectos sobre la corrosión.**

La corrosión atmosférica se puede definir como la corrosión de los materiales expuestos al aire y sus contaminantes, en lugar de sumergirse en un líquido.

Clasificación de la corrosión atmosférica:

- ✓ Seca
- ✓ Húmeda
- ✓ Mojada

### **2.6.1. Corrosión seca.**

En ausencia de humedad, muchos metales se corroen muy lentamente a temperatura ambiente. La aceleración de la corrosión en condiciones secas se logra a temperaturas elevadas. La corrosión seca a temperatura ambiente ocurre en metales con energía negativa libre que forma óxidos y luego forma rápidamente películas termodinámicamente estables en presencia de oxígeno. Estas partículas suelen ser deseables porque son impecables, no porosas y actúan como una barrera protectora para aislar el metal base del ataque de la corrosión. Metales como el acero inoxidable, el titanio y el cromo están desarrollando este tipo de película protectora. Las películas porosas antiadherentes formadas espontáneamente sobre metales no negativos, tales como aceros sin alear, son generalmente indeseable (Garita Arce, Rodríguez Yañez, y Robles Cordero 2014).

### **2.6.2. Corrosión húmeda.**

Los requisitos de humedad atmosférica y su intensidad aumentan con el aumento de la humedad. Cuando la humedad supera un valor crítico, es decir, una humedad relativa de alrededor del 70%, se forma una película delgada e invisible de humedad en la superficie del metal, que proporciona un electrolito para la transmisión de corriente eléctrica. El valor crítico depende de las condiciones de la superficie, como la limpieza, la formación de productos de corrosión o la presencia de sales u otros contaminantes que pueden absorber agua a bajas temperaturas y una humedad relativa extremadamente baja.

### 2.6.3. Corrosión mojada.

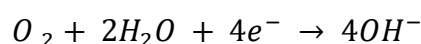
Ocurre cuando la brisa del mar, la lluvia o el rocío forman gotas o películas de agua visibles sobre las superficies metálicas. Cuando las superficies son planas y secas, las grietas o las trampas de condensación provocan la acumulación de agua, lo que provoca corrosión atmosférica húmeda.

Durante la corrosión húmeda, la solubilidad de los productos de corrosión puede afectar la tasa de corrosión. En general, cuando se funde el producto de corrosión, aumenta la velocidad de corrosión. Esto sucede porque los iones disueltos suelen aumentar la conductividad eléctrica del electrolito y, por lo tanto, reducen la resistencia interna a la corriente eléctrica, lo que conduce a una corrosión acelerada. En condiciones alternas de humedad y sequía, la formación de productos de corrosión insolubles en la superficie puede acelerar la corrosión durante el ciclo de secado al deshumidificar y humedecer continuamente la superficie metálica (Curley-Fiorino y Schmid 1980).

### 2.7. Sistema electroquímico de la corrosión atmosférica:

1. Material metálico o susceptible a la corrosión (concreto)
2. Productos de corrosión (óxidos o hidróxidos metálicos) y posiblemente otros depósitos.
3. Capa superficial de electrolito (agua más o menos contaminada)
4. La atmósfera (presencia de humedad y contaminantes)

La reacción catódica general es la reducción de oxígeno, que se difunde a través de la capa superficial de agua y depósitos. El espesor de la película de agua puede tener un gran efecto, pero es más familiar relacionar la corrosión atmosférica con otros parámetros. A continuación, se presenta la ecuación química del agua en presencia de oxígeno y electrones libres que reaccionan para formar hidróxidos que son agentes corrosivos para los metales.





Factores que determinan la corrosión atmosférica:

1. El tiempo de humedad.
2. La composición del electrolito de la superficie.
3. La temperatura.

Los factores principales que determinan la corrosión dependen por una parte del tipo de atmósfera:

- ✓ Rural (interior)
- ✓ Marina
- ✓ Urbano
- ✓ Industrial

## 2.8. Velocidad de la corrosión uniforme.

La corrosión superficial uniforme se puede expresar como pérdida de peso por unidad de área por tiempo, normalmente en miligramos por decímetro cuadrado por día (mdd) (Smith & Javad, 2014).

Denominando:

$V_c$  = Velocidad de corrosión

$m$  = masa

$A$  = área

$t$  = tiempo

$V$  = volumen

$\rho$  = densidad

$x$  = espesor

Por definición:

$$V_c = \frac{m}{A t}$$

Realizando el reemplazo correspondiente podemos determinar el espeso  $x$  que será consumido por la corrosión, a partir de la velocidad de corrosión, la densidad del material y del tiempo.

$$A = \frac{m}{V_c t}$$

$$\frac{V}{x} = \frac{m}{V_c t}$$

$$\frac{V}{x} = \frac{V\rho}{V_c t}$$

$$x = \frac{V_c t}{\rho}$$

También se suele expresar la velocidad de corrosión como la pérdida en profundidad del material por tiempo unitario, por ejemplo, milímetros por año (mm/año) (Smith & Javad, 2014).

## 2.9. Grados de óxido.

Los grados de óxido se clasifican como: A, B, C, D y se definen de la siguiente manera:

- A. Superficie de acero cubierta en su mayoría por cascarilla de laminación, con poco o ningún óxido presente.
- B. Superficie de acero que ha comenzado a oxidarse y en la que la cascarilla de laminación ha empezado a desprenderse.
- C. Superficie de acero en la que la cascarilla de laminación ha oxidado por completo o puede ser raspada, pero con una ligera corrosión visible a simple vista.
- D. Superficie de acero en la que la cascarilla de laminación se ha oxidado por fuera y en el que las picaduras en general son visibles bajo la visión normal (INEN, 2014).

Estos grados de óxido son utilizados para describir el estado de corrosión de una superficie de acero y son útiles en la evaluación y clasificación de la condición de los materiales en diferentes aplicaciones.

La corrosión atmosférica está relacionada con el tiempo de humectación (TDH), es decir al tiempo en el que el metal está expuesto a la humedad suficiente para que la corrosión ocurra.

Delgado y otros, en un estudio realizado durante 8 años en 14 países obtuvieron la siguiente correlación:

$$TDH = 730.5 (-1.12 + 0.012 T + 0.019 HR), \quad R^2 = 0.65 \quad (\text{Delgado, Castaño, Correa, Restrepo, \& Echeverría, 2009}).$$

Donde:

T: temperatura (en °C) y

HR: humedad relativa (en %).

El modelo de Feliu y Morcillo define:

$$V_c = a + b TDH + c SO_2 + d Cl + e T + f HR + g P \quad (\text{Garita, Rodriguez, \& Roble, 2014}).$$

En el mismo estudio se obtuvieron las respectivas constantes a partir de datos experimentales y el uso de software informático.

Obteniendo siguiente la ecuación:

$$V_c = -17.96 + 65.75 TDH - 5.34 SO_2 + 4.80 ClO^-$$

$$V_c = -229.02 + 0.063 \cdot SO_2 + 6,73 \cdot Cl + 2.345 \cdot HR \quad (\text{Garita Arce, Rodriguez Yañez, y Robles Cordero 2014}).$$

Con coeficiente de correlación  $R^2 = 0.935$  y  $R^2 = 0.972$  respectivamente.

Donde:

Vc: Velocidad de corrosión en  $\mu\text{m} \times \text{año}$

TDH: Tiempo de humedad.

SO<sub>2</sub>: Concentración de dióxido de sulfuro en  $\text{mg} / \text{m}^2 \cdot \text{día}$

Cl<sup>-</sup>: Concentración de cloro en  $\text{mg} / \text{m}^2 \cdot \text{día}$

T: Temperatura media °C

HR: Humedad relativa media anual en %

P: Precipitación anual en mm

También se plantea en dicho estudio la siguiente ecuación general:

$$\text{Log}(Vc) = a + n \log(t)$$

En la cual:

V<sub>c</sub>: representa la velocidad de corrosión en  $\mu\text{m}$  acumulado

t: tiempo en años

a: valor inicial del primer año

n: inverso del nivel de protección de la capa de óxido.

A partir del experimento los investigadores obtuvieron los valores de las constantes a y n para cada lugar estudiado, tomando un promedio de los valores obtenidos para a y n definiremos la ecuación para este modelo:

$$\text{Log}(Vc) = 1.53 + 0.58 \log(t)$$

$$\text{Log}(Vc) = a + n \log(t) + b \text{Cl}_2 + c \text{SO}_2 + d \text{TDH}$$

t: es el tiempo en horas acumulado

TDH: Tiempo de humedad acumulado

Reemplazando los valores de a, b, c y n obtenidos a partir de los datos experimentales

Tenemos:

$$\text{Log}(V_c) = 1.68 + \log(t) + 5.85 \cdot 10^{-6} Cl_2 + 5.94 \cdot 10^{-6} SO_2 + -0.62 \cdot 10^{-5} TDH$$

Un cuarto modelo presentado en este estudio es el siguiente:

$$V_c = 1,77 SO_2 0,52 e^{(0,020 \cdot HR - 0,054 \cdot (T-10))} + 0,102 Cl_2 0,62 e^{(0,033 \cdot HR + 0,040 \cdot T)} \text{ (Garita Arce, Rodriguez Yañez, y Robles Cordero 2014).}$$

## 2.10. Tipos de atmósfera.

La corrosión está influenciada por diferentes tipos de atmósferas en función del entorno en el que se encuentre el material. Aquí se describen brevemente tres tipos de atmósferas y sus factores corrosivos:

**Ambiente rural (interior):** Se caracteriza por ser seco, con poca o ninguna contaminación química. Aunque contiene partículas orgánicas e inorgánicas, suele ser la atmósfera menos corrosiva. Los principales factores corrosivos son la humedad, el oxígeno y el dióxido de carbono.

**Ambiente marino:** Se encuentra cerca del mar, con alta humedad y presencia de iones cloruros. Las partículas finas de cloruro que se depositan en las superficies hacen que sea altamente corrosivo. La corrosividad puede variar según la dirección y velocidad del viento, así como la distancia desde la costa. En regiones frías, el uso de sales de deshielo en las carreteras puede crear un entorno corrosivo similar.

**Ambiente urbano:** Está contaminado por gases de escape, humo y hollín. Aunque comparte similitudes con el ambiente rural en términos de poca actividad industrial, tiene contaminantes adicionales como  $SO_x$  y  $NO_x$ , provenientes de emisiones de vehículos y combustibles domésticos.

**Industrial:** Altamente contaminado por la industria que generan descargas y precipitados. Estas atmósferas están asociadas con instalaciones de procesamiento industrial pesado y pueden contener concentraciones de dióxido de azufre, cloruros, fosfatos y nitratos.(Garces Rodriguez Roberto Carlos (UANL) 2002).

Estas descripciones proporcionan una idea de los factores corrosivos predominantes en cada tipo de atmósfera, lo que ayuda en la comprensión de los desafíos de protección contra la corrosión en diferentes entornos.

### 2.11. Factores ambientales según la condición atmosférica de la región.

Las regiones costeras, tienden a tener las atmósferas más corrosivas debido al efecto de los cloruros azotados por el viento (altos niveles de humedad).

Los efectos de la lluvia (más ambiguos). Por un lado, proporciona la humedad necesaria para las reacciones de corrosión, pero, por otro lado, tiende a tener un efecto de limpieza al lavar o diluir las especies de superficie corrosivas (Benarie y Lipfert 1986).

### 2.12. Efectos de la humedad relativa y la contaminación del aire sobre la corrosión atmosférica de materiales.

- ✓ Las superficies metálicas que están completamente limpias y lisas, y no están expuestas a la contaminación atmosférica, no experimentarán una corrosión significativa incluso en presencia de una humedad relativa inferior al 100%.
- ✓ Sin embargo, materiales como el acero, el cobre, el zinc y el níquel son propensos a la corrosión cuando la humedad relativa alcanza niveles superiores al 50-70%.
- ✓ Si estas superficies metálicas también están contaminadas con partículas de cloruro, hollín o polvo que son higroscópicas (absorben la humedad del ambiente), la velocidad de corrosión será considerablemente más alta cuando la humedad relativa supere el 60%.

Estos puntos destacan la importancia de mantener las superficies metálicas limpias y protegidas de la contaminación, especialmente en ambientes con alta humedad

relativa y presencia de contaminantes como cloruros. La comprensión de estos factores es crucial para prevenir y controlar la corrosión en diversas aplicaciones industriales y estructurales.

### 2.12.1. Tipos de atmosferas y velocidades de deposición de $Cl^-$ y $SO_2$ sobre la velocidad de corrosión del acero.

**Tabla 2.** Tipos de atmosferas y velocidades de deposición

Tipo de atmósfera	Tasas de deposición (mg/m <sup>2</sup> d)	Velocidad de corrosión en estado estacionario (µm/año)	Ejemplos de regiones afectadas
Rural	<20	<3	Medido en varios lugares de Escandinavia y del este de Europa occidental
Urbana	20-100	<3-50	
Industrial	110-200		
Marina	<10	3- >100	Medido después de 4 años de exposición en varios lugares de Escandinavia
Ártica	<10	<3	Medido después de 4 años de exposición, Galibare, norte de Suecia

Las velocidades de corrosión se corresponden bien con las velocidades de deposición de  $Cl^-$  y  $SO_2$  (Garita Arce, Rodriguez Yañez, y Robles Cordero 2014).

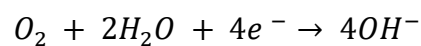
### 2.13. Teoría de la corrosión atmosférica.

Reacción anódica:  $2Fe \rightarrow 2Fe_2 + + 4e^-$

Reacción catódica:  $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$

- ✓ En el hierro, la humedad crítica es del 60% en una atmósfera libre de dióxido de azufre.
- ✓ El nivel crítico de humedad no es constante y depende de la corrosión del material, la tendencia de los productos de corrosión y los depósitos superficiales a absorber la humedad y la presencia de contaminantes atmosféricos.
- ✓ En presencia de electrolitos de película delgada el oxígeno de la atmósfera es suministrado fácilmente.

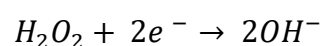
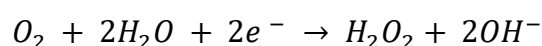
### 2.13.1. Proceso catódico.



La reducción del oxígeno atmosférico es una reacción crucial en la corrosión. Sin embargo, cuando hay contaminantes gaseosos presentes en el aire, es necesario tener en cuenta otras reacciones de reducción que involucran sustancias como el ozono, azufre y nitrógeno.

Es importante destacar que el mecanismo de transporte de difusión del oxígeno solo es aplicable en una capa de electrolito con un espesor aproximado de 30 mm en condiciones estrictamente isotérmicas. Esto significa que la difusión del oxígeno a través del electrolito juega un papel fundamental en el proceso de corrosión.

La consideración de las reacciones de reducción que implican diferentes contaminantes y la comprensión del mecanismo de transporte de difusión del oxígeno son aspectos clave en el estudio y la mitigación de la corrosión. Estas consideraciones permiten una mejor comprensión de los procesos químicos involucrados y facilitan el desarrollo de estrategias efectivas para prevenir y controlar la corrosión en diversas aplicaciones industriales.





Esta reacción ocurre en entornos altamente ácidos, lo que provoca un ataque corrosivo debajo de los recubrimientos. En estas condiciones, la producción de hidrógeno puede dar lugar a la formación de ampollas en el recubrimiento y a la corrosión de las grietas.

En ambientes altamente ácidos, los iones H<sup>+</sup> presentes en el medio interactúan con la superficie metálica, generando una reacción química que resulta en corrosión. Esta corrosión puede ser especialmente perjudicial cuando ocurre debajo de los recubrimientos protectores, ya que el ácido puede penetrar y debilitar la estructura metálica.

La formación de hidrógeno como producto de la reacción corrosiva puede conducir a la acumulación de presión en los poros o defectos del recubrimiento, lo que a su vez provoca la formación de ampollas. Estas ampollas pueden romperse y exponer aún más la superficie metálica a la corrosión, acelerando el proceso corrosivo.

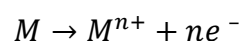
Además, las condiciones de corrosión en las grietas, como la acumulación de ácido y la falta de oxígeno, también pueden ser propicias para la corrosión localizada y el deterioro de la integridad estructural.

Por lo tanto, es crucial considerar la naturaleza ácida del medio y tomar medidas preventivas para proteger adecuadamente las superficies metálicas en ambientes altamente ácidos, como la selección de recubrimientos resistentes a la corrosión y la aplicación de prácticas de inspección y mantenimiento regulares.

.

### **2.13.2. Proceso anódico.**

La reacción anódica generalizada en la corrosión atmosférica se puede representar como:



En esta reacción, el metal M se oxida y pierde electrones (representados por el símbolo "e<sup>-</sup>"), formando iones metálicos M<sup>n+</sup>. El número de electrones liberados en la reacción depende del estado de oxidación del metal (representado por "n").

Esta reacción anódica es fundamental en la corrosión, ya que implica la pérdida de electrones por parte del metal y su transformación en iones metálicos. Es importante

destacar que esta reacción puede ocurrir en presencia de la humedad y otros agentes corrosivos presentes en la atmósfera, lo que conduce al deterioro del metal y la formación de productos de corrosión. La comprensión de esta reacción y su velocidad es crucial para el estudio y la prevención de la corrosión atmosférica en diferentes materiales.

#### 2.14. **Modelo tipo GILDES.**

Mecanismo de reacción para los procesos de formación y descomposición de productos de corrosión para explicar las velocidades de corrosión atmosférica (Graedel, 1985).

Basada en seis regímenes diferentes o regiones:

- 1) La región gaseosa (G)
- 2) La interfaz de gas a líquido (I)
- 3) El líquido de superficie (L)
- 4) La capa de deposición (D)
- 5) La capa electródica (E)
- 6) El sólido corrosivo (S).

- 1. La región gaseosa (G):** En esta etapa, se considera el transporte y la transferencia de especies a través de la interfaz líquida, las transformaciones químicas, los efectos de la radiación solar en las reacciones fotosensibles atmosféricas, la influencia de la temperatura y la cinética de la reacción.
- 2. La interfaz gas-líquido (I):** En esta etapa, se estudia la transferencia de moléculas desde la fase gaseosa hacia la capa líquida antes de su interacción química en dicha capa. No solo ocurre la transferencia de especies desde la fase gaseosa al líquido, sino que también se produce la volatilización de especies del líquido hacia la fase gaseosa.
- 3. La capa líquida superficial (L):** En esta etapa, se considera el espesor de la película acuosa y su efecto en la concentración de especies, las transformaciones químicas en el líquido y las reacciones que involucran iones

metálicos que se originan a partir de las reacciones de corrosión electroquímica.

4. **La capa de deposición (D):** En esta zona, los productos de corrosión se acumulan después de su nucleación en el sustrato. Las especies más termodinámicamente estables tienden a dominar en esta etapa.
5. **La capa electródica (E):** En esta etapa, el flujo de carga puede quedar atrapado dentro o debajo de los productos de corrosión formados. Las capas de productos de corrosión depositados pueden actuar como membranas con diferentes grados de resistencia al transporte iónico. Las películas pasivantes pueden representar barreras sólidas para el transporte iónico.
6. **El sólido corrosivo (S):** En esta etapa, se analizan los pasos mecanicistas detallados involucrados en la disolución del sólido y sus características cinéticas. Se requieren conocimientos especializados en diversos campos científicos para formular matemáticamente los procesos de transición y transformación en estos regímenes (GILDES).

## 2.15. Efectos de corrosión atmosférica para diferentes materiales.

*Tabla 3. Corrosión atmosférica en diferentes materiales*

Material	Resistencia a la corrosión	Tipos de corrosión	Velocidad de corrosión
Aluminio	Buena en diversas atmósferas.	Picaduras, intergranular, galvánica en contacto con cobre, acero dulce (en atmósfera marina) y grafito.	5 gm/año en promedio
Cobre	Altamente resistentes debido a películas pasivantes de óxidos de cobre	Picaduras y galvánica.	Inferior a 2-3 $\mu\text{m/año}$

Estaño y Níquel	Altamente resistentes	Picadura, galvánica.	Inferior a 2 $\mu\text{m/año}$
Plomo	Excelente resistencia debido a películas protectoras.	Picadura, galvánica y erosión.	Inferior a 1 $\mu\text{m/año}$
Acero inoxidable	No se corroe	Ninguna	Despreciable.

## 2.16. Variables prácticas de importancia de la corrosión atmosférica.

**Tiempo de exposición a la humedad (TOW):** Se refiere al período necesario para que se forme una película de electrolito en la superficie corroída. El TOW está influenciado principalmente por la humedad relativa crítica. La definición ISO del TOW se basa en el número de horas en las que la humedad relativa supera el 80% y la temperatura excede los 0 °C.

**Dióxido de azufre:** El dióxido de azufre desempeña un papel significativo en la corrosión atmosférica en entornos urbanos e industriales. Se adhiere a las superficies metálicas, es altamente soluble en agua y tiende a formar ácido sulfúrico cuando está presente en películas de humedad en la superficie. La oxidación del dióxido de azufre da lugar a la formación de iones sulfato en la capa de humedad superficial.

**Cloruros:** La presencia de cloruros en la atmósfera aumenta considerablemente las velocidades de corrosión atmosférica. Además de facilitar la formación de electrolitos en la superficie debido a sales higroscópicas como el  $\text{NaCl}$  y el  $\text{MgCl}_2$ , los iones cloruro también pueden participar directamente en reacciones de corrosión electroquímica.

En los metales ferrosos, se sabe que los aniones cloruro compiten con los iones hidroxilo para combinarse con los cationes ferrosos producidos en la reacción anódica (Harsimran, Santosh, y Rakesh 2021).

### 2.17. Otros contaminantes atmosféricos.

El sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ), el cloruro de hidrógeno ( $HCl$ ) y el cloro ( $Cl_2$ ) presentes en la atmósfera pueden agravar el daño causado por la corrosión atmosférica, pero representan casos especiales que están principalmente relacionados con las emisiones industriales en microclimas específicos.

Los compuestos de nitrógeno en forma de óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) también tienden a acelerar el proceso corrosivo atmosférico. El ozono ( $O_3$ ) en la atmósfera puede aumentar la velocidad de deposición del dióxido de azufre. La deposición de partículas sólidas desde la atmósfera puede tener un efecto significativo en las velocidades de corrosión atmosférica, especialmente en las etapas iniciales. Estos depósitos pueden estimular el proceso de corrosión atmosférica a través de tres mecanismos:

1. Reducción de los niveles críticos de humedad debido a su acción higroscópica.
2. Provocación de la disolución del metal al proporcionar aniones.
3. Generación de efectos microgalvánicos debido a la presencia de depósitos más nobles que el metal corroído.

La temperatura también tiene un efecto complejo en las tasas de corrosión atmosférica. Un aumento en la temperatura tiende a promover la corrosión al acelerar las reacciones electroquímicas y los procesos de difusión. En condiciones de humedad relativa constante, un aumento en la temperatura resultaría en una mayor velocidad de corrosión. Sin embargo, el aumento de la temperatura generalmente conduce a una disminución en la humedad relativa y a una evaporación más rápida del electrolito superficial. Esto puede reducir el tiempo de exposición a la humedad y, por lo tanto, disminuir la velocidad de corrosión general.

En espacios cerrados, como ambientes interiores, se ha observado que el aumento de la humedad relativa asociado con una disminución de la temperatura tiene un efecto primordial en la velocidad de corrosión.

Esto implica que el aire acondicionado simple que disminuye la temperatura sin deshumidificación adicional, acelera el daño por corrosión atmosférica (Dang et al. 2022).

## 2.18. Termodinámica de la corrosión.

La energía en un sistema se puede cuantificar mediante la energía libre de Gibbs ( $G$ ). En relación a la corrosión, pueden darse tres situaciones:

1. Cambios positivos en la energía libre de Gibbs ( $\Delta G$ ): En esta situación, los metales son reactivos y propensos a la corrosión. Esta es la situación más común para los metales de uso común.
2. Pasivación: Aunque el cambio en la energía libre ( $\Delta G$ ) sea mayor que cero, puede darse el caso en el que el metal no muestre corrosión aparente. Se dice que el metal está pasivado, es decir, forma una capa protectora que evita o reduce la corrosión.
3. Cambios nulos o negativos en la energía libre ( $\Delta G$ ): En este caso, el metal no reaccionará frente a los corrosivos comunes y no ocurrirá una reacción de corrosión. Esto es típico de los metales preciosos.

Para determinar la probabilidad de una reacción de corrosión espontánea en condiciones reales, es necesario conocer los cambios de energía asociados con la reacción, es decir, la energía del metal antes y después de la corrosión.

El cambio de energía libre de Gibbs se calcula como la diferencia entre la energía en el estado final y la energía en el estado inicial:

$$\Delta G = \sum (\text{energía estado final}) - \sum (\text{energía estado inicial})$$

Si el signo del cambio es negativo, indica que se está pasando de un estado de mayor energía a uno de menor energía. Este tipo de proceso se denomina espontáneo y ocurre naturalmente al liberar energía por sí mismo. El cambio de energía libre de Gibbs en una reacción es igual al trabajo reversible total que se puede realizar (Zhang, Castel, y François 2009).

## 2.19. Modelos matemáticos generalizados para análisis de la velocidad de corrosión.

Existen diversos modelos matemáticos para la predicción y análisis de la corrosión atmosférica en diferentes tipos de materiales, entre ellos se pueden mencionar:

### 2.19.1. Modelo de Velocidad de Corrosión.

Este modelo se utiliza para predecir la tasa de corrosión de un material en un ambiente determinado, considerando factores como la temperatura, humedad y la composición química del ambiente.

El modelo de velocidad de corrosión toma en cuenta varios factores que pueden influir en la velocidad de corrosión, como la composición química del material, la temperatura, la humedad relativa, la presencia de gases corrosivos y la velocidad del flujo de aire. Estos parámetros se consideran porque afectan la reactividad del material y la transferencia de masa durante el proceso de corrosión.

El modelo de velocidad de corrosión se basa en la teoría electroquímica de la corrosión, que considera la interacción entre el material, el electrolito (ambiente corrosivo) y los procesos electroquímicos que ocurren en la interfaz entre el material y el electrolito. Los fenómenos electroquímicos, como la oxidación y reducción de especies químicas, influyen en la velocidad de corrosión.

Los datos necesarios para aplicar el modelo de velocidad de corrosión incluyen la composición química del material, las propiedades electroquímicas del material y del electrolito, y las condiciones ambientales en las que se encuentra el material.

Al utilizar este modelo, es posible predecir la velocidad de corrosión de un material en un ambiente específico, lo que proporciona información valiosa para diseñar medidas de protección contra la corrosión, seleccionar materiales adecuados y evaluar la vida útil de los componentes expuestos a condiciones corrosivas.

Ley de Tafel:

$$v = k \times (E - E_{corr})$$

Donde:

- ✓  $v$ : es la velocidad de corrosión.
- ✓  $k$ : es una constante de proporcionalidad que depende del sistema corrosivo y las propiedades del material.
- ✓  $E$ : es el potencial aplicado al material.
- ✓  $E_{\text{corr}}$ : es el potencial de corrosión, que representa el potencial al cual ocurre la corrosión.

Este modelo se basa en la relación lineal entre la velocidad de corrosión y la diferencia entre el potencial aplicado y el potencial de corrosión. Cuanto mayor sea la diferencia entre estos potenciales, mayor será la velocidad de corrosión.

Es importante destacar que este modelo es una simplificación y existen otros modelos más complejos que consideran factores adicionales, como la concentración de especies corrosivas, la resistencia de polarización y otros parámetros electroquímicos.

Además, es necesario tener en cuenta que cada sistema corrosivo y material específico puede requerir modelos adaptados a sus características particulares, por lo que los parámetros y ecuaciones pueden variar en función del caso específico de estudio. Los modelos matemáticos más detallados y precisos se desarrollan a través de análisis experimentales y estudios específicos de corrosión para cada material y ambiente corrosivo (Curley-Fiorino y Schmid 1980).

### **2.19.2. Modelo de Concentración de Corrosión.**

Este modelo se basa en la concentración de especies químicas corrosivas en la superficie del material y en el ambiente circundante, lo que permite predecir la velocidad de corrosión y el tipo de productos de corrosión que se formarán.

El modelo puede variar dependiendo del tipo de corrosión y las especies corrosivas específicas involucradas. Por ejemplo, en la corrosión por oxidación, la concentración de oxígeno puede ser un factor importante. En la corrosión ácida, la concentración de iones de hidrógeno (acidez) puede ser determinante.



Es importante mencionar que el modelo de concentración de corrosión también puede considerar la formación de productos de corrosión y su influencia en la concentración de especies corrosivas. Al formarse productos de corrosión en la superficie del material, pueden generar una barrera protectora que reduce la exposición del material a las especies corrosivas y disminuye la velocidad de corrosión.

Para aplicar el modelo de concentración de corrosión, es necesario realizar análisis químicos y mediciones experimentales para determinar la concentración de especies corrosivas relevantes en el ambiente y en la superficie del material. Estos datos se utilizan para establecer las relaciones matemáticas y desarrollar el modelo específico para el caso particular de estudio.

Cabe destacar que la complejidad y precisión del modelo pueden variar dependiendo de la complejidad del sistema corrosivo y las interacciones químicas involucradas en la corrosión.

El modelo matemático del Modelo de Concentración de Corrosión puede variar dependiendo del sistema corrosivo y las especies químicas involucradas. La ecuación que muestra la relación entre la velocidad de corrosión y la concentración de especies corrosivas es:

$$v = k \times [C]$$

Donde:

- ✓  $v$ : es la velocidad de corrosión.
- ✓  $k$ : es una constante de proporcionalidad que depende del sistema corrosivo y las propiedades del material.
- ✓  $[C]$ : es la concentración de la especie corrosiva.

En este modelo simplificado, se asume que la velocidad de corrosión es directamente proporcional a la concentración de la especie corrosiva. Cuanto mayor sea la concentración de la especie corrosiva, mayor será la velocidad de corrosión.

La especie corrosiva se refiere a una sustancia o compuesto químico presente en el ambiente o en contacto con un material que tiene la capacidad de causar corrosión. Estas especies corrosivas pueden ser gases, líquidos o incluso partículas sólidas.

Como la corrosión es un proceso electroquímico en el cual un material interactúa con su entorno, y las especies corrosivas desempeñan un papel fundamental en este proceso. Dependiendo del tipo de corrosión y del material involucrado, las especies corrosivas pueden variar (Harsimran, Santosh, y Rakesh 2021).

Algunas de las especies corrosivas comunes incluyen:

1. Oxígeno ( $O_2$ ): En muchos casos, el oxígeno es una especie corrosiva que puede acelerar la corrosión, especialmente en metales como el hierro, que pueden oxidarse en presencia de oxígeno y agua.
2. Ácidos: Los ácidos fuertes, como el ácido clorhídrico ( $HCl$ ) o el ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), son especies corrosivas que pueden atacar y corroer metales y otros materiales.
3. Humedad: La presencia de agua o humedad es una especie corrosiva importante en muchos procesos de corrosión. La humedad puede facilitar la corrosión al permitir la transferencia de iones y reacciones electroquímicas en la superficie del material.
4. Iones cloruro ( $Cl^-$ ): Los iones cloruro, especialmente en altas concentraciones, son altamente corrosivos y pueden causar corrosión en metales como el acero inoxidable.

Estos son solo algunos ejemplos de especies corrosivas comunes, pero existen muchas otras sustancias que pueden ser corrosivas en diferentes situaciones y contextos.

Es importante tener en cuenta las especies corrosivas presentes en un ambiente o en contacto con un material, ya que la comprensión de estas especies y su interacción con el material es fundamental para el diseño de estrategias de prevención y protección contra la corrosión.

Cada sistema corrosivo y cada especie corrosiva pueden requerir ecuaciones y modelos específicos adaptados a sus características particulares. Por lo tanto, es necesario realizar estudios y análisis experimentales para determinar los parámetros y las relaciones matemáticas adecuadas en cada caso específico de estudio.

El modelo matemático exacto para el Modelo de Concentración de Corrosión dependerá de los detalles del sistema corrosivo y las especies químicas involucradas.

### 2.19.3. Modelo de Cinética de Corrosión.

Este modelo considera la cinética química de la corrosión, lo que permite determinar la velocidad de corrosión y el tipo de productos de corrosión que se formarán en función del tiempo y las condiciones ambientales.

Considera las reacciones químicas que ocurren en la interfaz entre el material y el medio corrosivo, y cómo estas reacciones influyen en la velocidad de corrosión. La cinética de corrosión puede ser influenciada por varios factores, como la temperatura, la concentración de especies corrosivas, el pH y la composición química del material.

Un modelo matemático comúnmente utilizado para describir la cinética de corrosión es la ecuación de Tafel, que se basa en la teoría de reacciones electroquímicas. La ecuación de Tafel relaciona la velocidad de corrosión con el potencial de electrodo:

$$v_c = B \times \exp(-E_a/RT)$$

Donde:

- ✓  $v_c$ : es la velocidad de corrosión.
- ✓  $B$ : es una constante relacionada con la cinética de la reacción corrosiva.
- ✓  $E_a$ : es la energía de activación para la reacción corrosiva.
- ✓  $R$ : es la constante de los gases ideales.
- ✓  $T$ : es la temperatura absoluta.
- ✓  $E$ : es el potencial de electrodo.

Esta ecuación muestra que la velocidad de corrosión disminuye exponencialmente con la energía de activación y la temperatura, y está relacionada con el potencial de electrodo. El potencial de electrodo puede verse afectado por varios factores, como la concentración de especies corrosivas y el  $pH$ .

Es importante tener en cuenta que existen varios modelos de cinética de corrosión disponibles, y la elección del modelo adecuado depende del sistema corrosivo y el material de estudio. Además, en algunos casos, pueden ser necesarias modificaciones o modelos más complejos para considerar factores adicionales, como

la formación de películas pasivantes o la presencia de películas de productos de corrosión.

El Modelo de Cinética de Corrosión se enfoca en las reacciones químicas y electroquímicas que ocurren durante la corrosión y busca describir la velocidad de corrosión y su evolución en función del tiempo y las condiciones ambientales. (Salazar 2015).

#### **2.19.4. Modelo de Difusión y Transporte.**

Este modelo se utiliza para predecir la difusión de especies químicas corrosivas en la superficie del material y el ambiente circundante, lo que permite determinar la tasa de corrosión y la forma en que se propagará.

Cuando ocurre la corrosión, se forman productos de corrosión en la superficie del material. Estos productos de corrosión pueden formar una capa o película protectora sobre el material, y la difusión de especies corrosivas a través de esta capa puede ser un factor determinante en la velocidad y el mecanismo de corrosión.

En el caso de una película de productos de corrosión, el modelo de difusión y transporte considera la difusión de iones y moléculas corrosivas a través de la película. La difusión puede ocurrir tanto en la dirección del material hacia el medio corrosivo (difusión hacia afuera) como en la dirección del medio corrosivo hacia el material (difusión hacia adentro). La velocidad de corrosión dependerá de la eficiencia de la difusión de las especies corrosivas a través de la película.

En el caso de un medio poroso, como un revestimiento o una capa de pintura, el modelo de difusión y transporte considera la difusión de especies corrosivas a través de los poros del medio. La concentración y la movilidad de las especies corrosivas en los poros pueden influir en la velocidad de corrosión y la penetración de las especies corrosivas hacia la superficie del material.

El Modelo de Difusión y Transporte utiliza ecuaciones matemáticas, como las ecuaciones de Fick para la difusión, para describir el movimiento de las especies corrosivas a través de la película o el medio poroso. Estas ecuaciones consideran factores como la concentración inicial de las especies corrosivas, el gradiente de concentración y los coeficientes de difusión.

Es importante destacar que el Modelo de Difusión y Transporte puede ser complejo y requiere datos experimentales y propiedades físicas y químicas precisas del material y del medio corrosivo. Además, pueden ser necesarios análisis numéricos o simulaciones computacionales para resolver las ecuaciones de difusión y transporte.

El Modelo de Difusión y Transporte se utiliza para estudiar la difusión de especies corrosivas a través de películas de productos de corrosión o medios porosos, y cómo esta difusión afecta la velocidad y el mecanismo de corrosión (Benarie y Lipfert 1986).

La ecuación de difusión en una dimensión para la concentración de especies corrosivas puede ser expresada como:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D * \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

Donde:

- ✓ C: es la concentración de especies corrosivas en función del tiempo (t) y la posición (x).
- ✓ D: es el coeficiente de difusión que representa la capacidad de las especies corrosivas para difundir en el medio.

Esta ecuación describe cómo la concentración de especies corrosivas cambia en el tiempo y el espacio debido a la difusión. La derivada parcial  $\partial C/\partial t$  representa la tasa de cambio de la concentración en función del tiempo, y la derivada parcial  $\partial^2 C/\partial x^2$  representa la tasa de cambio de la concentración en función de la posición.

La solución de esta ecuación depende de las condiciones iniciales y de frontera específica del sistema corrosivo y el medio poroso. Estas condiciones pueden incluir la concentración inicial de especies corrosivas, las condiciones de frontera en los extremos del medio (como una concentración constante o un gradiente de concentración), y las propiedades del material y del medio, como el coeficiente de difusión.

Es importante tener en cuenta que este es solo un ejemplo simplificado y que los modelos reales pueden ser más complejos e incluir términos adicionales, como la

advección (transporte convectivo) si hay un flujo de fluido en el sistema, reacciones químicas adicionales, consideración de barreras o interfaces adicionales, entre otros.

En la práctica, resolver este tipo de ecuaciones de difusión y transporte puede requerir métodos numéricos y simulaciones computacionales para obtener soluciones aproximadas que reflejen el comportamiento real del sistema corrosivo.

El modelo exacto de difusión y transporte puede variar dependiendo del sistema corrosivo específico y las condiciones particulares del estudio (Andrade y Alonso 2004).

## 2.20. Fundamentos matemáticos y físicos para el modelo cinemático de la velocidad de corrosión.

La cinemática es una rama de la física que se encarga de estudiar el movimiento de los objetos sin tener en cuenta las causas que lo producen, como las fuerzas o interacciones. Por otro lado, el cálculo es una herramienta matemática que nos permite analizar el cambio y la variación en diversas magnitudes.

La combinación de la cinemática y el cálculo nos brinda la posibilidad de obtener una descripción matemática más precisa y detallada del movimiento de los objetos. El cálculo nos proporciona herramientas para analizar el cambio y la variación de magnitudes fundamentales en la cinemática, como la posición, la velocidad y la aceleración.

Por ejemplo, para estudiar el movimiento de un objeto en una dimensión, podemos utilizar el cálculo diferencial para calcular la velocidad instantánea. La velocidad se define como la derivada de la posición con respecto al tiempo:

$$v(t) = \frac{dx}{dt}$$

Donde  $v(t)$  es la velocidad en función del tiempo,  $x$  es la posición y  $t$  es el tiempo. Al calcular la derivada de la posición con respecto al tiempo, obtenemos la velocidad instantánea en cualquier punto del movimiento.

De manera similar, podemos utilizar el cálculo integral para obtener información sobre la posición a partir de la velocidad. La integral de la velocidad nos proporciona la posición en función del tiempo:

$$x(t) = \int v(t) dt$$

Donde  $x(t)$  es la posición en función del tiempo y  $\int v(t) dt$ , es la integral de la velocidad.

El cálculo también nos permite obtener información sobre la aceleración, que es la tasa de cambio de la velocidad con respecto al tiempo. Utilizando el cálculo diferencial, podemos calcular la aceleración como la derivada de la velocidad con respecto al tiempo:

$$a(t) = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}$$

Donde  $a(t)$  es la aceleración en función del tiempo.

Al integrar la aceleración no permite analizar la velocidad para un instante de tiempo:

$$v(t) = \int a(t) dt$$

Estas son solo algunas aplicaciones básicas del cálculo en el estudio de la cinemática. Mediante el uso de técnicas de cálculo más avanzadas, como la diferenciación e integración parciales, es posible abordar problemas más complejos y obtener resultados más detallados sobre el movimiento de los objetos.

Cuando la velocidad está en función de la posición y no del tiempo, se puede escribir la ecuación de la siguiente manera:

$$v = f(x)$$

$$v(t) = \frac{dx}{dt} = f(x)$$

$$\int \frac{dx}{f(x)} = \int dt$$

La aceleración se puede expresar también en función de la posición y podemos escribir la ecuación de la siguiente manera:

$$a = f(x)$$

$$a(t) = \frac{dv}{dt} = f(x)$$

$$\frac{dv}{dt} \frac{dx}{dx} = f(x)$$

$$\int v dv = \int f(x) dx$$

La combinación de la cinemática con el cálculo nos permite realizar un análisis más profundo y preciso del movimiento de los objetos. (Francis Sears, Mark Zemansky, pág. 58)

El cálculo nos proporciona las herramientas necesarias para calcular magnitudes como la velocidad y la aceleración, y obtener información detallada sobre la posición en función del tiempo. Esta aplicación del cálculo en la cinemática nos permite comprender mejor los fenómenos del movimiento y realizar predicciones más precisas en diversos contextos científicos y tecnológicos. Para este trabajo analizaremos la velocidad de corrosión la cual nos indica el cambio de espesor con respecto al tiempo de corrosión. También se podría analizar la velocidad de corrosión en función de la posición, ya que en muchos casos la corrosión no es uniforme y depende del lugar donde inicia la corrosión.



## CAPÍTULO III

### 3. Metodología

#### 3.1. Materiales y Métodos.

Con los datos obtenidos de estudios referenciados, se realizó una regresión lineal con la cual se obtuvo el siguiente modelo:

$$V_c = -0.0317 \cdot t + 0.0637 \cdot TDH + 0.0433 \cdot Cl_2 - 0.1163 \cdot SO_2$$

Mediante el uso del software de cálculo Matlab, se realizó un estudio comparativo de los modelos matemáticos de la corrosión atmosférica presentada en el capítulo II, para seleccionar de los modelos de la **Tabla 4**, el que más se ajuste a los valores experimentales.

**Tabla 4.** Modelos matemáticos de la corrosión.

	MODELOS MATEMÁTICOS
1	$V_c = -0.0317 \cdot t + 0.0637 \cdot TDH + 0.0433 \cdot Cl_2 - 0.1163 \cdot SO_2$
2	$V_c = -229.02 + 0.063 \cdot SO_2 + 6,73 \cdot Cl_2 + 2.345 \cdot HR$
3	$Log (V_c) = 1.53 + 0.58 \log(t)$
4	$Log (V_c) = 1.68 + \log (t) + 5.85 \cdot 10^{-6} Cl_2 + 5.94 \cdot 10^{-6} SO_2 + -0.62 \cdot 10^{-5} TDH$
5	$V_c = 1,77 SO_2 0,52 e^{(0,020 \cdot HR - 0,054 \cdot (T-10))} 0,102 Cl_2 0,62 e^{(0,033 \cdot HR + 0,040 \cdot T)}$

La Tabla 5 muestra los datos que se han tomado de un estudio que sigue en experimentación para un proyecto de análisis de la corrosión muy detallado a gran escala en la parte costera del país.

**Tabla 5.** Localidades costeras con información de las variables de corrosión.

Tiempo (meses)	Ubicación	V <sub>corr</sub> µm/año	TDH (h)	(mg x m Cl <sub>2</sub> )	(mg x m SO <sub>2</sub> )
5	Playas	153	1557	417	356
5	Daule	178	2323	296	336
5	Pedro Carbo	37	1669	115	384
5	Santo Domingo	9	991	113	416
7	Guayaquil	149	1832	665	166
7	Quevedo	66	2279	-153	771
7	Playas	180	3185	2529	1217
7	Daule	292	4670	2243	1522
9	Pedro Carbo	133	3600	1658	2086
9	Santo Domingo	29	2691	1862	1959
9	Guayaquil	381	4598	2772	787
9	Quevedo	208	3445	522	1448
9	Playas	273	4041	3481	2435
9	Daule	391	6642	3379	2297
14	Pedro Carbo	184	5278	2435	2641
14	Santo Domingo	57	4153	2784	2892
14	Guayaquil	484	6405	4222	1538
14	Quevedo	305	6602	1164	1715
14	Playas	377	6490	5391	3477
14	Daule	485	10328	5275	3324
20	Pedro Carbo	228	7787	3652	3583
20	Santo Domingo	92	6421	4206	3984
20	Guayaquil	689	10110	6641	2255
20	Quevedo	354	8411	2219	3796
20	Playas	433	8901	7735	4756
20	Daule	599	14227	7549	4532
25	Pedro Carbo	299	11234	5534	5038
25	Santo Domingo	168	9688	6386	5658
25	Guayaquil	944	13804	9171	3004
36	Quevedo	451	13046	3869	5334
48	Quevedo	561	16706	5519	7062
60	Quevedo	655	21602	7169	8600

En el código desarrollado en Matlab, se utiliza regresión lineal múltiple para encontrar un modelo matemático que describa la velocidad de corrosión. Este modelo se basa en los datos experimentales obtenidos previamente.

Además, el código realiza una comparación entre diferentes modelos propuestos en otros estudios para la corrosión atmosférica. Se evalúan estos modelos y se selecciona aquel que mejor se ajuste a los datos experimentales recopilados. Esto permite calcular la vida útil del galvanizado y realizar un análisis de factibilidad para determinar si esta técnica puede prolongar la vida útil del techado.

El proceso general del código puede incluir los siguientes pasos:

1. Importar los datos experimentales de corrosión atmosférica.
2. Definir las variables independientes que pueden influir en la velocidad de corrosión, como la humedad relativa, la temperatura, la presencia de contaminantes, etc.
3. Realizar la regresión lineal múltiple para encontrar el modelo matemático que mejor se ajuste a los datos experimentales. Esto implica calcular los coeficientes de regresión que representan la relación entre las variables independientes y la velocidad de corrosión.
4. Comparar los modelos propuestos en otros estudios para la corrosión atmosférica y evaluar su ajuste a los datos experimentales.
5. Seleccionar el modelo que mejor se ajuste a los datos y utilizarlo para calcular la vida útil del galvanizado en el techado.
6. Realizar un análisis de factibilidad para determinar si el galvanizado es una opción viable para prolongar la vida útil del techado, considerando factores como costos, durabilidad y beneficios potenciales.

El código en Matlab proporciona una herramienta para analizar y tomar decisiones informadas sobre la protección contra la corrosión y la prolongación de la vida útil de los materiales en entornos atmosféricos corrosivos.

## 3.2. Programa en Matlab el análisis los modelos de velocidad de corrosión.

```
clc;close;clear all
e=exp(1)
datos = readtable('datos.xls');
datos= table2array(datos)
Vc=datos(:,1)
X=[datos(:,2) datos(:,3) datos(:,4) datos(:,5)]
b = regress(Vc,X)
Vc_calc1=b(1)*datos(:,2)+b(2)*datos(:,3)+b(3)*datos(:,4)+b(4)*datos(:,5);
Vc_calc2=- 17.96 + 65.75*datos(:,3)-5.34*datos(:,5)+ 4.80*datos(:,4);
Vc_calc3 = 229.02 + 0.063*datos(:,5) + 6,73*datos(:,4)+ 2.345*0.8
Vc_calc4=10.^(1.53 + 0.58*log10(datos(:,2)))
Vc_calc5=10.^(1.68 + log10(datos(:,2))+ 5.85*10^(-6)*datos(:,4)+ 5.94*10^(-6)*datos(:,5)-0.62*10^(-5)*datos(:,3))
Vc_calc6=1.77*datos(:,5).^0.52.*e.^(0.020*0.80-0.054*(25-10))+0.102*datos(:,4).^0.62.*e.^(0.033*0.80+0.040*25)
x=[1:1:32]
figure (1)
plot(x,Vc)
xlim([0 35])
ylim([0 1200])
hold on
plot(x,Vc_calc1)
title ('Modelo 1')
ylabel({'V_corrosión', '(microm por año)'})
xlabel({'muestras experimentales'})
legend('Vc exp', 'Vc Calc')
%plot(x,Vc_calc2)
figure (2)
plot(x,Vc)
xlim([0 35])
ylim([0 1200])
hold on
plot(x,Vc_calc3)
title ('Modelo 2')
ylabel({'V_corrosión', '(microm por año)'})
xlabel({'muestras experimentales'})
legend('Vc exp', 'Vc Calc')
figure (3)
plot(x,Vc)
xlim([0 35])
ylim([0 1200])
hold on
plot(x,Vc_calc4)
title ('Modelo 3')
ylabel({'V_corrosión', '(microm por año)'})
xlabel({'muestras experimentales'})
legend('Vc exp', 'Vc Calc')
figure (4)
plot(x,Vc)
xlim([0 35])
ylim([0 1200])
hold on
plot(x,Vc_calc5)
title ('Modelo 4')
ylabel({'V_corrosión', '(microm por año)'})
xlabel({'muestras experimentales'})
legend('Vc exp', 'Vc Calc')
figure (5)
plot(x,Vc)
```

```

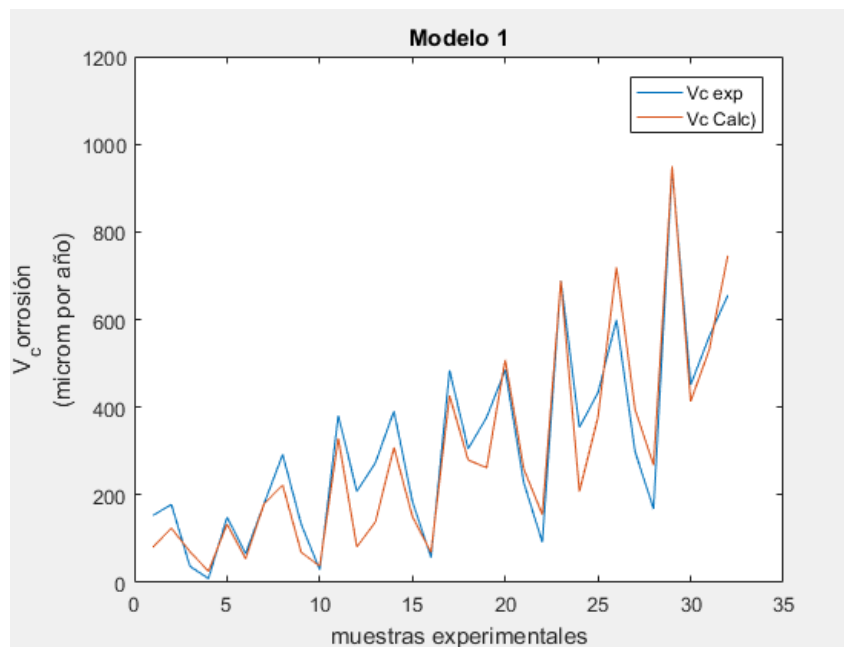
xlim([0 35])
ylim([0 1200])
hold on
plot(x,Vc_calc6)
title ('Modelo 5')
ylabel({'V_corrosión', '(microm por año)'})
xlabel({'muestras experimentales'})
legend('Vc exp', 'Vc Calc')

```

### 3.3. Análisis gráfico de los modelos.

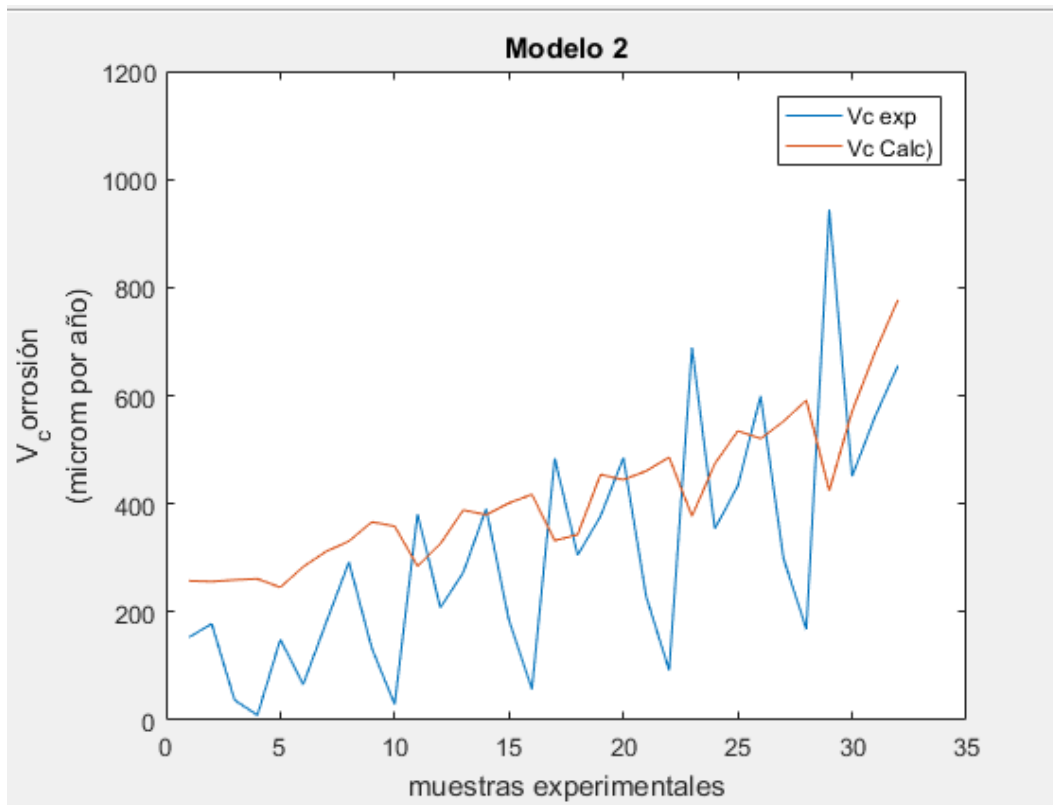
A continuación, se presentan las gráficas de los valores de corrosión calculados a partir de los modelos matemáticos estudiados comparadas con la gráfica los valores obtenidos experimentalmente en los estudios mencionados.

**Figura 2.** Vc calculado M1 Vc experimental.



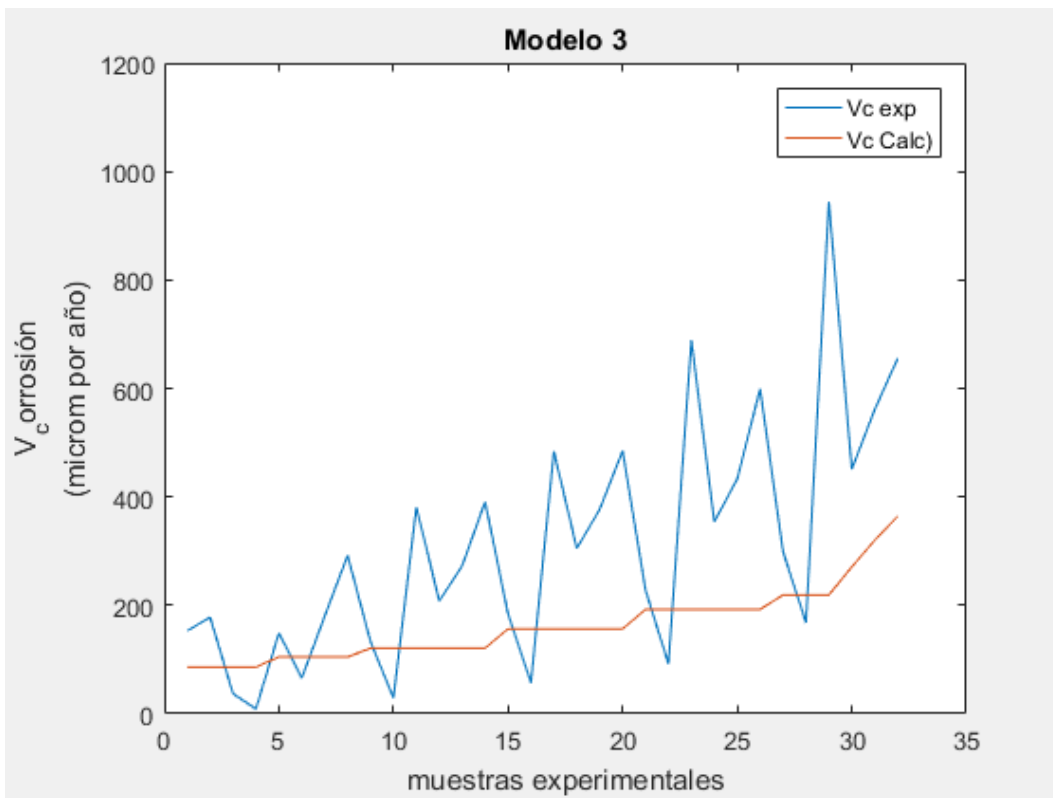
*Fuente propia*

**Figura 3.**  $V_c$  calculado M2  $V_c$  experimental.



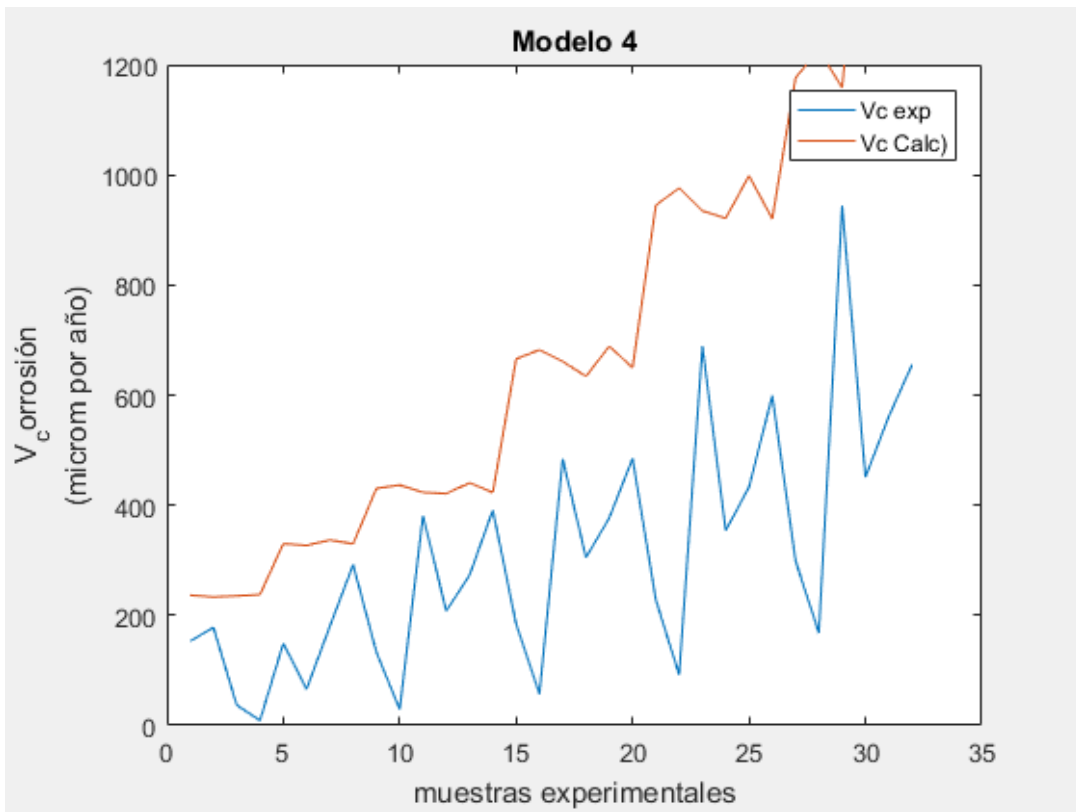
Fuente propia

**Figura 4.**  $V_c$  calculado M3  $V_c$  experimental.



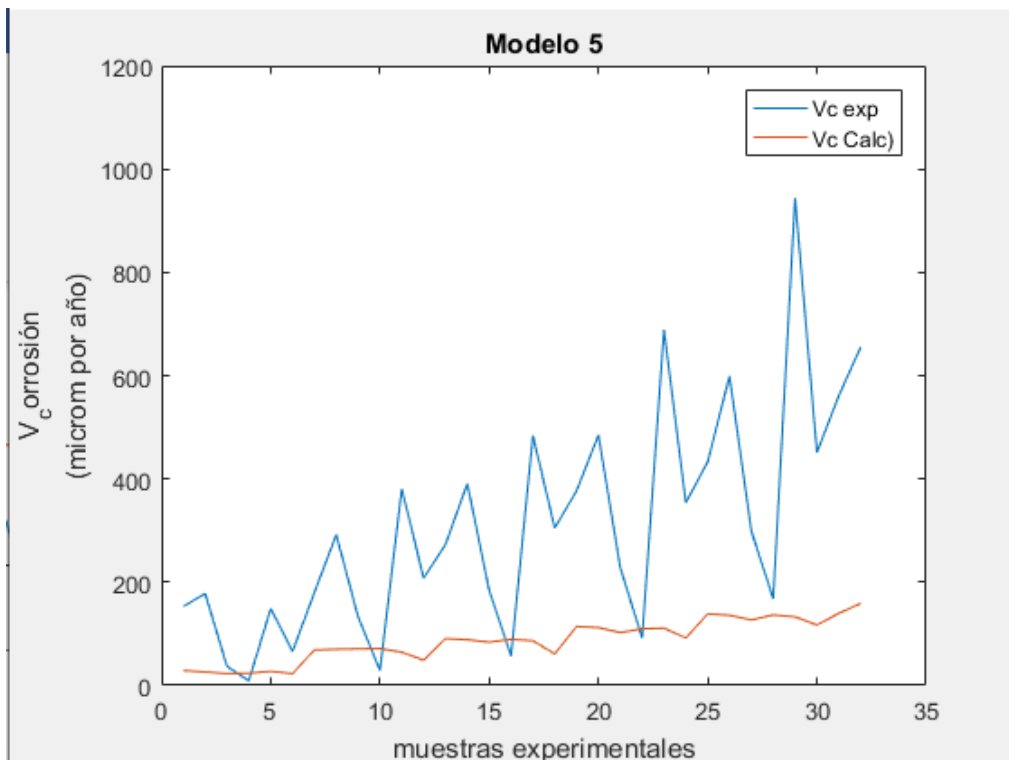
Fuente propia

Figura 5.  $V_c$  calculado M4  $V_c$  experimental.



Fuente propia

Figura 6.  $V_c$  calculado M5  $V_c$  experimental.



Fuente propia

### 3.4. Análisis económico.

En la **Tabla 6** se enlistan los precios de planchas metálicas disponibles en el mercado para realizar los estudios de factibilidad, son a la fecha del mes de marzo de 2023.

**Tabla 6.** Lista de precios de planchas metálicas disponibles en el mercado.

Largo[m]	Ancho[m]	Espesor[mm]	Precio [\$]
3,00	0.8	0.30	18
4,20	0.8	0.30	24
5,00	0.8	0.30	32
6,00	0.8	0.30	42

En la **Tabla 7** se muestra el espesor del galvanizado en caliente con los precios para diferentes espesores.

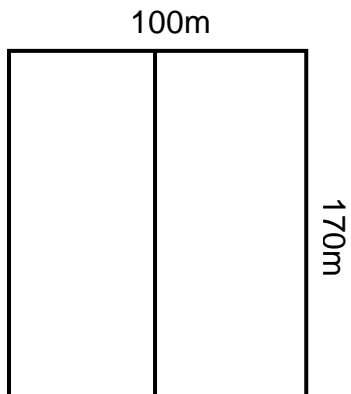
**Tabla 7.** Dimensiones, espesores y costo para el galvanizado de planchas.

Largo[m]	Ancho[m]	Espesor de aporte de galvanizado de zinc en caliente[mm]	Precio del galvanizado en caliente [\$]
2,44	1,22	0.40	20
2,44	1,22	0.50	39
2,44	1,22	0.70	54
2,44	1,22	0.90	69
2,44	1,22	1.10	83
2,44	1,22	1.40	106

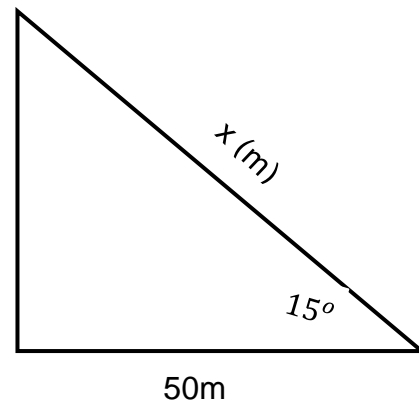


La **Figura 7** y **Figura 8**, muestran las vistas superior y lateral para el cálculo del área de cubierta para un área de almacenaje aproximada de 17000m<sup>2</sup> existentes en la ciudad de Guayaquil.

**Figura 7.** Vista superior del galpón.



**Figura 8.** Vista lateral del galpón.



$$\text{Área de cubierta} = 2 * \frac{50}{\cos 15^\circ} * 170 \approx 17600m^2$$

Cálculo del número de planchas para la cubierta de los 17600m<sup>2</sup> con unidades existentes en el mercado de 6,0m\*0,8m\*0,3mm.

$$\text{número de planchas} = \frac{17600}{6*0,8} \approx 3670 \text{ planchas}$$

La mano de obra actual por m<sup>2</sup> de techado para galpones es de aproximadamente \$45.

$$\text{Costo total de la cubierta} = (3670 * 42) + (45 * 17600) = \$946140$$

$$v = \frac{dx}{dt}$$

$$V_{corr} = \frac{\text{espesor corrosión}}{\text{tiempo de corrosión}} \rightarrow \text{vida útil} = \frac{\text{espesor corrosión}}{V_{corr}}$$

La vida útil del techado del galpón se puede calcular como:

$$\text{vida útil} = \frac{0,3\text{mm}}{V_{corr}}$$

$$V_{corr} = \frac{dx}{dt} = -0.0317 \cdot t + 0.0637 \cdot TDH + 0.0433 \cdot Cl_2 - 0.1163 \cdot SO_2$$

En la **Tabla 8**, se demuestra que el modelo para la velocidad de corrosión, la influencia del tiempo se vuelve despreciable y la vida útil depende en su mayor medida de las condiciones ambientales de la zona.

**Tabla 8.** Análisis de la Velocidad de corrosión.

t (meses)	TDH	Cl <sub>2</sub>	OS <sub>2</sub>	Vcorr (con t)	Vcorr (sin t)	error %
4	2557	1397,35	355,62	181,900749	182,027549	0,07%
4	3323	1275,71	336,01	227,70858	227,83538	0,06%
4	2669	1094,82	383,96	172,639658	172,766458	0,07%
4	1991	1093,35	415,85	125,6786	125,8054	0,10%
6	2832	1644,83	165,67	232,161918	232,352118	0,08%
6	3279	827,16	771,35	154,790123	154,980323	0,12%
6	4185	3509,22	1217,21	276,782003	276,972203	0,07%
6	5670	3222,71	1521,75	323,552618	323,742818	0,06%
8	4600	2638,31	2086,31	164,36737	164,62097	0,15%
8	3691	2841,92	1958,76	130,114448	130,368048	0,19%
8	5598	3751,62	786,66	427,295588	427,549188	0,06%
8	4445	1501,99	1447,64	179,568535	179,822135	0,14%
8	5041	4460,64	2435,05	230,807497	231,061097	0,11%
8	7642	4359,44	2297,27	408,133051	408,386651	0,06%
12	6278	3414,55	2640,62	240,274109	240,654509	0,16%

12	5153	3764,04	2892,05	154,503217	154,883617	0,25%
12	7405	5201,99	1538,32	517,657651	518,038051	0,07%
12	7602	2144,08	1714,7	377,286054	377,666454	0,10%
12	7490	6370,6	3476,8	348,22774	348,60814	0,11%
12	11328	6255,18	3324,06	605,474316	605,854716	0,06%
18	8787	4632,32	3582,81	343,059953	343,630553	0,17%
18	7421	5186,26	3983,5	233,431108	234,001708	0,24%
18	11110	7620,52	2254,72	774,88098	775,45158	0,07%
18	9411	3199,13	3795,87	295,972748	296,543348	0,19%
18	9901	8714,5	4756	454,33815	454,90875	0,13%
18	15227	8528,72	4532,24	811,583364	812,153964	0,07%
24	12234	6513,92	5038,11	474,665543	475,426343	0,16%
24	10688	7365,7	5657,5	341,03236	341,79316	0,22%
24	14804	10151,32	3003,52	1032,49678	1033,25758	0,07%
36	14046	4848,98	5334,02	483,203308	484,344508	0,24%
48	17706	6498,8	7061,71	586,471767	587,993367	0,26%
60	22602	8148,62	8600,06	790,493668	792,395668	0,24%

Debido a la poca o despreciable dependencia del tiempo respecto a otras variables, el modelo para el cálculo de la vida útil del techado se puede escribir de la siguiente manera:

$$vida\ útil = \frac{espesor\ corrosión}{V_{corr}}$$

$$vida\ útil = \frac{300\mu m}{0.0637 * TDH + 0.0433 * CL2 - 0.1163 * OS2}$$

En la **Tabla 9**, se muestra la vida útil en años de una plancha de techado, para diferentes partes del Ecuador. Se realizó el promedio para cada una de las variables que intervienen en la velocidad de corrosión de cada localidad respectiva.

**Tabla 9.** Cálculo de la vida útil de la plancha metálica.

Ubicación	TDH (h)	(mg x m Cl- 2)	(mg x m SO2- 2)	Espesor (µm)	Vida Útil (años)
-----------	---------	-------------------	--------------------	--------------	---------------------

Daule	523	240	203	300	14,93
Guayaquil	553	253	166	300	11,16
Pedro Carbo	910	209	410	300	15,52
Playas	1090	480	420	300	7,25
Salinas	1487	490	663	300	7,73
Santo Domingo	1122	90	501	300	17,54

$$vida\ útil\ con\ galvanizado = \frac{300 + espesor\ de\ galvanizado(\mu m)}{0.0637 * TDH + 0.0433 * CL2 - 0.1163 * OS2}$$

La **Tabla 10**, muestra la vida útil de las planchas si estas fuesen galvanizadas en caliente para diferentes espesores en contraste de las planchas no galvanizadas.

**Tabla 10.** Vida útil de las planchas metálica con galvanizado para diferentes espesores.

Ubicación	TDH (h)	(mg x m Cl <sup>-2</sup> )	(mg x m SO <sub>2</sub> <sup>-2</sup> )	Espesor (μm)	vida Útil sin galvanizado (años)	Espesor de galvanizado o en caliente (μm)	Vida Útil con galvanizado (años)
Daule	523	240	203	300	14,93	400	34,83
						700	49,76
						1100	69,66
Guayaquil	553	253	166	300	11,16	400	26,05
						700	37,21
						1100	52,09
Pedro Carbo	910	209	410	300	15,52	400	36,21
						700	51,72
						1100	72,41
Playas	1090	480	420	300	7,25	400	16,92
						700	24,17
						1100	33,84
Salinas	1487	490	663	300	7,73	400	18,03
						700	25,75
						1100	36,05
Santo Domingo	1122	90	501	300	17,54	400	40,93
						700	58,47
						1100	81,86

$$\text{Costo total de la cubierta con galvanizado} = (3670 * 42) + 17600(45 + 20)$$

En la **Tabla 11**, se muestra cual sería la proyección del ahorro si la cubierta se realiza con planchas que han sido galvanizadas con 0,4 mm de espesor.

**Tabla 11.** Resumen del análisis de costos y ahorro con galvanizado.

Ubicación	vida Útil sin galvanizado (años)	Espesor de galvanizado en caliente (µm)	Vida Útil con galvanizado (años)	Costo de techado para un área de 17600 m <sup>2</sup> sin galvanizado	Costo de techado para un área de 17600 m <sup>2</sup> con galvanizado de 0,4 mm	Costo de techado sin galvanizado para años de vida útil galvanizado de 0,4mm	Ahorro debido al galvanizado
Daule	14,93	400	34,83	\$ 946.140	\$ 1.298.140	\$ 2.999.660	\$ 1.701.520
Guayaquil	11,16	400	26,05	\$ 946.140	\$ 1.298.140	\$ 2.999.660	\$ 1.701.520
Pedro Carbo	15,52	400	36,21	\$ 946.140	\$ 1.298.140	\$ 2.999.660	\$ 1.701.520
Playas	7,25	400	16,92	\$ 946.140	\$ 1.298.140	\$ 2.999.660	\$ 1.701.520
Salinas	7,73	400	18,03	\$ 946.140	\$ 1.298.140	\$ 2.999.660	\$ 1.701.520
Santo Domingo	17,54	400	40,93	\$ 946.140	\$ 1.298.140	\$ 2.999.660	\$ 1.701.520

## CAPÍTULO IV

### 4. Análisis y Resultados

El programa realizado en Matlab comparó varios modelos propuestos por diferentes autores para estimar la velocidad de corrosión. En base a la comparación gráfica de los modelos con los datos experimentales, se encontró que el primer modelo se aproxima mejor a los datos reales. Este modelo tiene la siguiente forma:

$$V_c = -0.0317 \cdot t + 0.0637 \cdot TDH + 0.0433 \cdot CL_2 - 0.1163 \cdot OS_2$$

En este modelo, la velocidad de corrosión ( $V_c$ ) se determina por la exposición a la humedad ( $TDH$ ), la concentración de cloruros ( $Cl_2$ ) y la concentración de dióxido de azufre ( $OS_2$ ), que son factores presentes en el ambiente y cuyo aumento depende de la cercanía de la localidad con el mar. Estos compuestos se consideran los principales contribuyentes a la corrosión en áreas costeras.

En el capítulo II se describe que este tipo de compuestos en el ambiente son los que más contribuyen en la corrosión, en atmósferas costeras de nuestro país. Los datos recolectados son parte de una extensa base de datos de estudios y experimentos que actualmente se siguen realizando para el estudio del fenómeno de la corrosión en una Universidad del país.

El programa en Matlab nos muestra los resultados de manera gráfica la cual nos permite de manera visual y acertada verificar cual es el modelo que más se aproxima a los datos reales. Se puede observar en la gráfica que el modelo 2 intenta modelar los datos de manera centrada a los datos reales.

En la gráfica del tercer modelo se puede observar que su gráfica está por debajo de los datos reales y no sigue una coherente simulación a los datos reales

El modelo número cuatro se observa que la gráfica está por encima de la tabulación de datos, aunque sigue la tendencia se observa la diferencia y no da una buena estimación.

El quinto modelo se parece al tercero, se observa claramente la dispersión de los datos con la propuesta del modelo.

Después de analizar los modelos mediante el programa en Matlab, se investigó en el mercado los precios y dimensiones de las planchas para cubierta que se ofrecen en el país. Las dimensiones que habitualmente se usan son 3,0m\*0,8m\*0,3mm de espesor. También se enlista las dimensiones y precios para otras opciones.

La propuesta de este trabajo es analizar y promover un galvanizado extra para alargar su duración. Para ello, se puso en contacto con empresas dedicadas al galvanizado de metales y mediante la tabla se puede tener una referencia del precio por área de galvanizado en caliente.

Para un análisis de inversión real, se pudo constatar que en la ciudad de Guayaquil existen áreas destinadas al almacenamiento de productos que van desde los 8000m<sup>2</sup> hasta más de 18000m<sup>2</sup> que tienen su respectiva cubierta metálica.

El área del almacenaje para los cálculos y análisis posteriores fue de 17000m<sup>2</sup>. Mediante análisis trigonométrico, se calculó que el área de cubierta la cual es aproximadamente 17600m<sup>2</sup>. El ángulo de 15<sup>o</sup> fue seleccionado por norma de construcción de galpones, la cual indica que el mínimo ángulo de cubierta para que el agua no quede atrapada debe ser el normado.

Con este cálculo del área, nos permite calcular la cantidad de planchas metálicas necesarias para su cubierta, la cual se determina que se requieren 3670 hojas aproximadamente. La mano de obra actual por instalación de cubiertas para galpones es de \$45. Con la información anterior se estima que para cubrir con techado metálico un área de 17600m<sup>2</sup> se requieren \$946140.

En la Tabla 8, se muestra que el modelo de la velocidad de corrosión no depende del tiempo de exposición, de manera específica, su vida útil depende del tiempo de humedad expuesta, de los cloruros y dióxidos de azufre circundantes en el ambiente. Se puede descartar esta variable de ya que los errores están muy por debajo de 1%. Eliminar esta variable para el modelo hace o permite una relación más simple para estimar la vida útil de la cubierta. La cual queda descrita a continuación.

$$vida\ útil = \frac{300\mu m}{0.0637 * TDH + 0.0433 * CL2 - 0.1163 * OS2}$$

El tiempo de vida útil queda definido como el espesor de la plancha metálica entre la velocidad de corrosión del modelo descrito anteriormente. Se calculó la vida útil para la plancha con y sin galvanizado y se tabula en la Tabla 10.

Se realiza una estimación de gastos si se quisiera obtener de vida útil el tiempo que nos brindaría al aplicar un galvanizado. Para ello se multiplicó un factor de la relación de años de vida útil, multiplicada por su inversión inicial, a esto se le suma la mano de obra de una segunda intervención. Finalmente, la Tabla 11, muestra el ahorro económico que se obtendría si las planchas metálicas aumentaran 0,4 mm de espesor por galvanizado en caliente. El ahorro estimado es alrededor de \$ 1.701.520 para precios actuales en el mercado.



## CAPÍTULO V

### 5. Conclusiones y Recomendaciones

#### 5.1. Conclusiones.

La velocidad de corrosión depende de muchos factores, variables y condiciones ambientales a la cual está expuesto el material. La teoría para su análisis es compleja y extensa, no es posible hallar un modelo general para cualquier ambiente. Se consideró la atmosfera corrosiva a nivel del mar y cercana a ella en este trabajo.

El análisis económico de la corrosión de metales proporciona una visión integral de los costos asociados con este fenómeno y destaca la importancia de implementar estrategias de prevención y mitigación.

Comprender los aspectos económicos de la corrosión es fundamental para tomar decisiones informadas en términos de inversión, mantenimiento para minimizar los impactos financieros negativos de este problema.

Los modelos de corrosión desempeñan un papel fundamental en la mitigación del impacto económico causado por este fenómeno. Estos modelos proporcionan una comprensión detallada de los mecanismos de corrosión y permiten predecir su desarrollo y efectos a lo largo del tiempo.

Utilizar estos modelos, se pueden identificar las áreas más susceptibles a la corrosión, evaluar la efectividad de las estrategias de mitigación y tomar decisiones informadas sobre la selección de materiales, diseño de estructuras y programas de mantenimiento. Esto ayuda a reducir los costos asociados con la corrosión, como reparaciones, reemplazos y pérdida de productividad.

Implementar un mayor espesor de galvanizado es una estrategia efectiva para extender la vida útil de las estructuras metálicas. El proceso de galvanizado proporciona una capa protectora de zinc que actúa como barrera contra la corrosión atmosférica. Esta capa evita el contacto directo del metal base con el ambiente corrosivo, reduciendo significativamente el riesgo de deterioro y prolongando la vida útil de las planchas.

Al elegir planchas galvanizadas, se garantiza una mayor resistencia a la corrosión y se reducen los costos asociados con el mantenimiento y reemplazo prematuro de las estructuras.

## 5.2. Recomendaciones.

Diseñar las cubiertas metálicas, considerando la geometría, los detalles de conexión de las estructuras. Además, llevar a cabo un mantenimiento regular y seguir las pautas establecidas para inspecciones periódicas, limpieza y reparación de daños en la capa de zinc.

Realizar un monitoreo regular y continuo de las estructuras expuestas a la corrosión, utilizando técnicas de inspección no destructivas y métodos de evaluación de la corrosión.

Realizar investigaciones sobre nuevos materiales y recubrimientos que ofrezcan una mayor resistencia a la corrosión y una vida útil prolongada. Esto puede incluir el desarrollo de materiales más resistentes a la corrosión o la mejora de las técnicas de galvanizado y otros tratamientos protectores.

Fomentar la colaboración entre investigadores, ingenieros, y profesionales de la industria para abordar el problema de la corrosión desde diferentes perspectivas. La combinación de conocimientos técnicos, científicos y económicos permitirá desarrollar soluciones más efectivas y rentables para mitigar el impacto económico de la corrosión.

Analizar el cambio de la velocidad de corrosión, esto implica evaluar si hay una aceleración o desaceleración en la velocidad a la cual ocurre la corrosión. Esto tiene un impacto directo en la vida útil del material, ya que una aceleración en la velocidad de corrosión puede reducir su duración, mientras que una desaceleración puede extenderla.

Para realizar este análisis, se podrían seguir los siguientes pasos:

1. Obtención de datos: Revisar los datos experimentales o los resultados obtenidos de los modelos matemáticos utilizados para estimar la velocidad de

corrosión. Estos datos deben incluir mediciones de corrosión en diferentes momentos o condiciones.

2. Cálculo de la velocidad de corrosión: Utilizar los datos para calcular la velocidad de corrosión en cada punto o condición. Esto se puede hacer mediante fórmulas específicas o mediante el uso de los modelos matemáticos utilizados.
3. Análisis de la tendencia: Graficar los valores de velocidad de corrosión en función del tiempo o las variables relevantes. Observar la tendencia general de los datos y si existe un cambio perceptible en la velocidad de corrosión a lo largo del tiempo.
4. Cálculo de la aceleración o desaceleración: Si se observa un cambio en la velocidad de corrosión, se puede calcular la aceleración o desaceleración correspondiente. Esto se puede hacer mediante técnicas de análisis numérico o ajuste de curvas para determinar la variación en la velocidad de corrosión a lo largo del tiempo.
5. Interpretación de los resultados: Evaluar los resultados obtenidos para determinar si hay una aceleración o desaceleración en la velocidad de corrosión. Si existe una aceleración, esto indica un aumento en la velocidad de deterioro del material, lo que puede reducir su vida útil. Por otro lado, si hay una desaceleración, significa que la corrosión se está produciendo a un ritmo más lento, lo que podría prolongar la vida útil del material.

Es importante tener en cuenta que el análisis del cambio en la velocidad de corrosión puede ser complejo y depende de la disponibilidad y calidad de los datos experimentales. Además, otros factores ambientales y condiciones de exposición pueden influir en la velocidad de corrosión, por lo que es necesario considerarlos en el análisis.

## 6. Referencias bibliográficas

- Andrade, Carmen, y Cruz Alonso. 2004. "Electrochemical Aspects of Galvanized Reinforcement Corrosion". *Galvanized Steel Reinforcement in Concrete*, 111–44. <https://doi.org/10.1016/B978-008044511-3/50020-7>.
- Benarie, Michel, y Frederick L. Lipfert. 1986. "A general corrosion function in terms of atmospheric pollutant concentrations and rain pH". *Atmospheric Environment (1967)* 20 (10): 1947–58. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(86\)90336-7](https://doi.org/10.1016/0004-6981(86)90336-7).
- Curley-Fiorino, M. E., y G. M. Schmid. 1980. "The effect of the Cl<sup>-</sup> ion on the passive film on anodically polarized 304 stainless steel". *Corrosion Science* 20 (3): 313–29. [https://doi.org/10.1016/0010-938X\(80\)90002-5](https://doi.org/10.1016/0010-938X(80)90002-5).
- Dang, Yen T.H., Aoife Power, Daniel Cozzolino, Khuong Ba Dinh, Binh Son Ha, Adam Kolobaric, Jitraporn Vongsvivut, Vi Khanh Truong, y James Chapman. 2022. "Analytical Characterisation of Material Corrosion by Biofilms". *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion* 8 (2): 1–17. <https://doi.org/10.1007/s40735-022-00648-2>.
- Garces Rodriguez Roberto Carlos (UANL). 2002. "Evaluacion Corrosion Atmosferica Acero En Diversas Atmosferas", 16–25.
- Garita Arce, Luis, Javier Rodriguez Yañez, y Javier Robles Cordero. 2014. "Modelado De La Velocidad De Corrosión Atmosférica De Acero De Baja Aleación En Costa Rica". *Revista Ingeniería* 24 (2): 79–90. <https://doi.org/10.15517/ring.v24i2.14624>.
- Harsimran, S., K. Santosh, y K. Rakesh. 2021. "Overview of Corrosion and Its Control: a Critical Review". *Proceedings on Engineering Sciences* 3 (1): 13–24. <https://doi.org/10.24874/PES03.01.002>.
- Kashani, Mohammad M., Adam J. Crewe, y Nicholas A. Alexander. 2013. "Use of a 3D optical measurement technique for stochastic corrosion pattern analysis of reinforcing bars subjected to accelerated corrosion". *Corrosion Science* 73: 208–21. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2013.03.037>.
- Reyes, Yhasmin, Alicia Durán, y Yolanda Castro. 2015. "Recubrimientos vítreos de cerio para la protección activa de aleaciones de aluminio". *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio* 54 (1): 28–36.

<https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2015.02.005>.

- Rodríguez, Juan J.Santana, F. Javier Santana Hernández, y Juan E.González González. 2003. "The effect of environmental and meteorological variables on atmospheric corrosion of carbon steel, copper, zinc and aluminium in a limited geographic zone with different types of environment". *Corrosion Science* 45 (4): 799–815. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(02\)00081-1](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(02)00081-1).
- Salazar, José Alberto. 2015. "Introduction to Corrosion Phenomena: Types, Influencing Factors and Control for Material's Protection". *Tecnología en Marcha* 28 (3): 10. <https://www.scielo.sa.cr/pdf/tem/v28n3/0379-3982-tem-28-03-00127.pdf>.
- Sander, G., J. Tan, P. Balan, O. Gharbi, D. R. Feenstra, L. Singer, S. Thomas, R. G. Kelly, J. R. Scully, y N. Birbilis. 2018. "Corrosion of additively manufactured alloys: A review". *Corrosion* 74 (12): 1318–50. <https://doi.org/10.5006/2926>.
- Zhang, Ruijin, Arnaud Castel, y Raoul François. 2009. "The corrosion pattern of reinforcement and its influence on serviceability of reinforced concrete members in chloride environment". *Cement and Concrete Research* 39 (11): 1077–86. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.07.025>.
- Zhou, Li, Zhonggui Li, Jun Ma, Ran Chen, Qixin Wang, Kaisheng Pei, Xuankun Zhang, y Yujiao Zhang. 2019. "Technical and economic analysis of ACCC Applied in UHV-DC power transmission lines". *2019 4th International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid, IGBSG 2019*, 169–72. <https://doi.org/10.1109/IGBSG.2019.8886199>.

## 7. ANEXOS

**Figura 9.** Bodegas de almacenaje ubicadas en la vía a Daule



Fuente: [www.plusvalia.com/bodega](http://www.plusvalia.com/bodega)

**Figura 10.** Cubiertas corroídas por el paso del tiempo.



Fuente: [www.123rf.com/photo\\_ADdos-y-oxidados](http://www.123rf.com/photo_ADdos-y-oxidados)

Figura 11. Norma INEN para la aplicación de anticorrosivos en superficies metálicas.



Quito – Ecuador

NORMA  
TÉCNICA  
ECUATORIANA

**NTE INEN-ISO 8501-1**

Segunda edición  
2014-XX

**PREPARACIÓN DE SUSTRATOS DE ACERO PREVIA A LA APLICACIÓN DE PINTURAS Y PRODUCTOS RELACIONADOS. EVALUACIÓN VISUAL DE LA LIMPIEZA DE LAS SUPERFICIES. PARTE 1: GRADOS DE ÓXIDO Y DE PREPARACIÓN DE SUSTRATOS DE ACERO NO PINTADOS DESPUÉS DE ELIMINAR TOTALMENTE LOS RECUBRIMIENTOS ANTERIORES (ISO 8501-1:2007, IDT)**

Fuente: INEN

Figura 12. Ficha técnica de cubiertas metálicas.



**KUBIZINC**  
el espesor si importa



## El techo de zinc de espesor correcto

Panel de acero recubierto de zinc, ideal para viviendas y galpones.



**BENEFICIOS:**

- Planchas de longitud de hasta 6 metros que minimizan goteras y evitan desperdicios.
- Revestimiento protector de zinc de superior espesor para mayor durabilidad según la norma ASTM A 653.
- Espesor correcto bajo norma NTE INEN 2221.
- Disponibilidad inmediata.

---



**USOS:**

- Viviendas rurales.
- Galpones agropecuarios de baja inversión.
- Construcciones temporales.
- Cerramientos temporales.

---



**CARACTERÍSTICAS:**

LONGITUDES DISPONIBLES	
Metros	Pies
2.40	8.00
3.00	10.00
3.60	12.00
4.20	14.00
5.00	16.50
6.00	20.00



**CONTACT CENTER**  
+593 22 690 061

[www.kubiec.com](http://www.kubiec.com)



KubiecConduit

Fuente: KUBIEC

64



Figura 13. Manual de galvanizado en caliente.

# GALVANIZADO EN CALIENTE PARA PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN

guía del especificador

- Corrosión**
  - Qué y Porqué
  - Proceso de la Corrosión
- Galvanizado en Caliente (HDG)**
  - Historia
  - Proceso
- Porqué los Especificadores Eligen HDG**
  - Protección Contra la Corrosión
    - Barrera, Catódico, Pátina de Zinc
  - Durabilidad
    - Resistencia a la Abrasión
    - Protección Uniforme
    - Cobertura Completa
  - Longevidad
    - Atmósfera
    - Suelo
    - Agua
    - Concreto
    - Otros Ambientes
  - Disponibilidad y Versatilidad
    - Materiales Abundantes
    - Eficiencia
    - Flexibilidad
  - Estética
    - Natural/Mezcla
    - Aplicaciones en Arquitectura
    - Sistemas Dúplex
  - Sostenibilidad
    - Ambiental
    - Económico
- Especificación de HDG**
- Conclusión**



© 2015 American Galvanizers Association. El material que se provee en el presente documento se ha desarrollado para brindar información precisa y acreditada sobre el acero galvanizado posterior a su fabricación. Este material proporciona información general solamente y no está previsto como un sustituto para el examen y la verificación competentes profesionales en cuanto a idoneidad y aplicabilidad. La información que se provee aquí no está prevista como una representación o garantía por parte de la AGA. Cualquiera que emplee esta información asume toda responsabilidad que surja de tal uso.