

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS**



**CURSO DE ESPECIALIZACIÓN EN INTRODUCCIÓN AL CONTROL DE LA  
CORROSIÓN INDUSTRIAL**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA ESTACIÓN DE MONITOREO DE LA  
CORROSIÓN AMBIENTAL**

**PRESENTADO POR:**

**ILIANA YAMILETH CALDERÓN AMAYA**

**JOSÉ MARIO MORENO RODRÍGUEZ**

**PARA OPTAR AL TÍTULO DE:**

**INGENIERO QUÍMICO**

**SAN SALVADOR, FEBRERO 2022.**

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

**RECTOR:**

**MSc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO**

**SECRETARIO GENERAL:**

**ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

**DECANO:**

**PhD. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA**

**SECRETARIO:**

**ING. JULIO ALBERTO PORTILLO**

**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS**

**DIRECTORA:**

**INGRA. SARA ELISABETH ORELLANA BERRIOS**

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS**

**Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:  
INGENIERO QUÍMICO**

**CURSO DE ESPECIALIZACION EN INTRODUCCIÓN AL CONTROL DE LA  
CORROSIÓN INDUSTRIAL**

**TÍTULO:**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA ESTACIÓN DE MONITOREO DE LA  
CORROSIÓN AMBIENTAL.**

**Presentado por:**

**ILIANA YAMILETH CALDERÓN AMAYA  
JOSÉ MARIO MORENO RODRÍGUEZ**

**Trabajo de Graduación aprobado por:**

**Docentes Asesores:**

**ING. HÉCTOR MANUEL GUERRA PÉREZ**

**San Salvador, Febrero 2022**

**TRABAJO DE GRADO APROBADO POR:**

**DOCENTE ASESOR**

**ING. HÉCTOR MANUEL GUERRA PÉREZ**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradeciendo especialmente a Dios, por permitirnos la vida, por guardar cada uno de nuestros pasos, y llevarnos por el buen camino. Por ayudarnos a culminar una nueva etapa de nuestras vidas, con éxito y empeño.

A la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, principalmente a la Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos, por proveer sus equipos y recursos, los cuales hicieron posible la etapa de aprendizaje mediante los ensayos de laboratorio.

A los profesores de la Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos, por todo el esfuerzo que ponen al momento de hacer sus investigaciones para exponerlas en horas de clase, por ese deseo de formar a los próximos profesionales del país, por sus largas horas de trabajo para transmitir todo su conocimiento y experiencias. Además de sus recomendaciones y opiniones, durante el desarrollo de la investigación.

A nuestros padres, por tener la visión de formar nuevos profesionales, por su apoyo tanto moral como económicos.

## RESUMEN

El estudio de la corrosión ambiental en un lugar determinado es muy importante en el campo industrial para determinar materiales, métodos de protección, programación de mantenimientos y muchas cosas más; también desde el ámbito estudiantil es muy importante poder contar con elementos que permitan reforzar los conocimientos sobre este tema; es por eso, que esta investigación se centró en la elaboración del diseño e implementación de una estación de monitoreo de la corrosión ambiental en el campus de la Universidad de El Salvador.

Durante la investigación se analizaron los diversos factores ambientales presentes en el área geográfica donde se ubica la universidad, así como las diferentes normas existentes sobre métodos de diseño y utilización de estaciones de este tipo.

en la investigación también se tomó en cuenta la parte económica para determinar el presupuesto ideal del proyecto, permitiendo así la implementación de un equipo de calidad a un precio que pueda ser cubierto por las personas involucradas en el proyecto, mismo diseño que puede ser tomado en cuenta para implementación de otras estaciones similares con el tiempo.

tanto el estudio técnico como el económico da como resultado un equipo y una metodología de los más altos estándares para obtener datos experimentales fiables para investigaciones dentro del marco de la corrosión ambiental, lo que permitirá el enriquecimiento de conocimientos técnicos y teóricos sobre el tema en los estudiantes y demás personas interesadas en realizar investigaciones sobre el tema.

## Índice

<b>Tema</b>	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO 1: MARCO CONTEXTUAL.....	3
1.1 Ubicación y contextualización.....	3
1.1.1 Contexto.....	3
1.2 Objetivos.....	6
1.2.1 Objetivo General.....	6
1.2.2 Objetivos Específicos.....	6
1.3 Justificación.....	7
1.4 Resultados esperados de la implementación de la estación de monitoreo .....	7
1.5 Delimitación y Limitaciones .....	8
CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO.....	9
2.1 Corrosión.....	9
2.1.1 Tipos de corrosión.....	11
2.1.2 Factores que influyen en el proceso de corrosión.....	20
2.2. Corrosión Ambiental.....	21
2.2.1 Influencia de las condiciones ambientales en la corrosión.....	22
2.2.2 Tipos de la corrosión atmosférica.....	25
2.2.3 Formas de la corrosión.....	26

<b>Tema</b>	<b>Pág.</b>
2.2.4 Contaminación de la atmósfera.....	27
2.2.4.1 Ciclo del azufre atmosférico.....	29
2.2.4.2 Influencia del azufre en el proceso de corrosión.....	30
2.2.4.3 Efecto de la lluvia ácida.....	30
2.2.4.4 Cloruros.....	31
2.2.5 Estándar para la construcción de la estación de monitoreo (ASTM G50-10 2015) .....	32
2.2.5.1 Propósito de la norma ASTM G50-10 2015.....	32
2.2.5.2 Bastidores y marcos de exposición.....	33
2.3 Caracterización del ambiente de San Salvador.....	34
2.3.1 Generalidades.....	34
2.3.2 Temperatura.....	34
2.3.3 Nubosidad.....	35
2.3.4 Lluvia.....	36
2.3.5 Luz Solar.....	37
2.3.6 Humedad.....	38
2.3.7 Viento.....	39
2.3.8 Clasificación del ambiente según la norma ISO 12944.....	41
<b>CAPITULO 3: METODOLOGÍA Y ANÁLISIS.....</b>	<b>43</b>
3.1 Procedimiento para medir el avance de la corrosión en la estación.....	43



<b>Tema</b>	<b>Pág.</b>
3.1.1 Material para las muestras de ensayo.....	43
3.1.2 Preparación de las muestras de ensayo.....	43
3.1.3 Recolección de datos.....	44
3.1.4 Exposición de las muestras.....	45
3.1.5 Recolección de las muestras.....	45
3.1.6 Limpieza de las muestras recolectadas conforme a la norma ASTM G-1.....	46
3.1.7 Cálculo de la corrosividad del ambiente.....	47
3.2 Cotización.....	48
3.2.1 Materiales.....	48
3.2.2 Mano de obra.....	51
3.3 Planos de la estructura.....	51
3.3.1 Vista frontal.....	51
3.3.2 Racks de exposición: .....	51
3.3.3 Piezas que regulan la inclinación de la base.....	52
3.3.4 Vista posterior de la estructura.....	53
3.3.5 Vista lateral.....	53
3.3.6 Vista de la base que sostendrá la estructura.....	54
3.4 Implementación.....	54
CONCLUSIONES.....	56

<b>Tema</b>	<b>Pág.</b>
RECOMENDACIONES.....	58
BIBLIOGRAFIA.....	59
ANEXOS.....	61

## INDICE DE TABLAS

<b>N° Tabla</b>	<b>Descripción</b>	<b>Pág.</b>
Tabla 2.1:	Valores de sustancias en el ambiente limpio y contaminado...	28
Tabla 2.2:	Categorías de Medio ambientes corrosivos según ISO 12944.....	42
Tabla 3.1:	Tabla para recolección de datos.....	44
Tabla 3.2:	Tabla para recolección de datos para un material específico...	45
Tabla 3.3:	Disoluciones para la limpieza de las muestras.....	47
Tabla 3.4:	Cotización de precios en diferentes ferreterías del país.....	49

## INDICE DE FIGURAS

<b>N° Figura</b>	<b>Descripción</b>	<b>Pág.</b>
Figura 1.1:	Ubicación de la Universidad de El Salvador.....	4
Figura 1.2:	El clima de San Salvador.....	5
Figura 2.1:	Representación de una celda electroquímica.....	10
Figura 2.2:	Serie galvánica para algunos metales y aleaciones comunes.....	11
Figura 2.3:	Tipos de corrosión.....	12
Figura 2.4:	Representación de la corrosión uniforme.....	12
Figura 2.5:	Proceso de corrosión galvánica.....	13
Figura 2.6:	Representación de los límites de grano.....	14
Figura 2.7:	Representación de la propagación de la grieta.....	14
Figura 2.8:	Diagrama de crecimiento de la Picadura.....	15
Figura 2.9:	Colapso de una burbuja de vapor.....	15
Figura 2.10:	Mecanismo de acción de la corrosión por cavitación .....	16
Figura 2.11:	Grietas generadas por corrosión por esfuerzo.....	16
Figura 2.12:	Corrosión bacteriana.....	17
Figura 2.13:	Esquema de la corrosión por Hidrogeno.....	17
Figura 2.14:	Corrosión por erosión.....	18
Figura 2.15:	Mecanismo esquemático de la corrosión por erosión.....	18
Figura 2.16:	Mecanismo de la corrosión por desgaste.....	19

<b>N° Figura</b>	<b>Descripción</b>	<b>Pág.</b>
Figura 2.17:	Relación entre corrosión ambiental y espesor de la capa del electrolito sobre la superficie metálica.....	23
Figura 2.18:	Acción del electrolito en la corrosión.....	26
Figura 2.19:	Categorías de la corrosión.....	27
Figura 2.20:	Ciclo del azufre en el ambiente.....	31
Figura 2.21:	Corrosión por cloruros.....	32
Figura 2.22:	Estructura para monitoreo de la corrosión ambiental construida bajo las indicaciones de la norma ASTM G50-10 2015.....	34
Figura 2.23:	Temperatura de San Salvador.....	35
Figura 2.24:	Nubosidad en San Salvador a lo largo del año.....	36
Figura 2.25:	Lluvia en San Salvador a lo largo del año.....	37
Figura 2.26:	Horario anual de luz solar en San Salvador.....	38
Figura 2.27:	Humedad en San Salvador.....	39
Figura 2.28:	Viento en San Salvador.....	40
Figura 2.29:	Dirección del viento.....	41
Figura 3.1:	Gráfica generada haciendo uso del método de pérdida de masa (ASTM G1) .....	46
Figura 3.2:	Plano de vista frontal del rack de exposición.....	51
Figura 3.3:	Plano del rack de la estructura.....	52
Figura 3.4:	Plano de vista de las piezas que regulan la inclinación de la base.....	52

<b>N° Figura</b>	<b>Descripción</b>	<b>Pág.</b>
Figura 3.5:	Plano de vista posterior de la estructura.....	53
Figura 3.6:	Plano de vista lateral de la estructura.....	53
Figura 3.7:	Plano de vista de las patas de la estructura.....	54
Figura 3.8:	Vista frontal del rack.....	54
Figura 3.9:	Vista lateral del rack.....	55
Figura 3.10:	Vista frontal del rack.....	55

## INTRODUCCIÓN

Desde hace tiempo, los científicos encargados del estudio de la corrosión atmosférica y los técnicos responsables para el diseño de protección y de mantenimiento de estructuras metálicas expuestas en la atmosfera han tratado de disponer de mapas de corrosión atmosférica. Los científicos, como medio de representación visual del dato de corrosión atmosférica. Los técnicos como herramienta para disponer de información sobre el alcance del fenómeno en un determinado punto geográfico y poder así seleccionar el material metálico más adecuado, tanto el punto de vista de la resistencia a la corrosión como del económico y para definir el tipo de protección anticorrosiva y la frecuencia de las operaciones de mantenimiento. La información contenida en los mapas de corrosión atmosférica ha contribuido también para realizar otro tipo de estimaciones, por ejemplo, acerca de la repercusión económica de la contaminación atmosférica de los costos de corrosión.

La corrosión atmosférica es la causa más frecuente de la destrucción de los metales y aleaciones. La acción conjunta de los factores de contaminación y los meteorológicos determinan la intensidad y naturaleza de los procesos corrosivos, y cuando actúan simultáneamente, aumentan sus efectos.

Con el tiempo se empezó a darle la importancia que este tema se merecía al momento de implementar nuevas estructuras o determinar métodos de mantenimientos más efectivos y duraderos, esto propició la aparición de normas y metodologías cuidadosamente elaboradas como por ejemplo las normas ASTM G-50 para el diseño de estructuras destinadas al estudio del efecto de la corrosión ambiental y la norma ASTM G-92 que nos proporciona un método experimental para obtener datos sobre el avance de la corrosión ambiental.

Con la relevancia que tiene este tema en la actualidad es de vital importancia contar con personas, equipos y métodos adecuados para poder aplicar estas mejoras en nuestro país, tenemos actualmente la ventaja de que es un tema que ha cobrado

importancia hace relativamente poco tiempo y hay un gran campo de oportunidad listo para ser aprovechado, motivo por el cual la implementación de estaciones destinadas al estudio del avance de la corrosión ambiental es sumamente necesario no solo para las grandes empresas que ya desarrollan trabajos en este tema sino para la nueva generación de profesionales que se encargaran de mejorar los métodos de protección existentes y desarrollar métodos correctivos adaptados a la situación climatológica de nuestro país y la naturaleza de la industria.

El diseño y metodología seguidos en esta investigación cumplen con los parámetros establecidos por las normas anteriormente mencionadas, el factor económico es analizado con detalle en base a los precios de los materiales en el mercado salvadoreño a la fecha de realizado el proyecto, por lo cual, es necesario destacar que si se desea tomar esta investigación como referencia en el futuro; la parte económica deberá ser replanteada según la situación del país en ese momento.

La investigación fue realizada estudiando en primer lugar la ubicación geográfica donde la estación sería implementada y su importancia, seguida de una serie de nociones básicas pero fundamentales acerca del tema de la corrosión ambiental, sus diferentes características, mecanismos de reacción y la manera en la que los diferentes factores ambientales afectan la gravedad en la que ésta se produce, para luego ofrecer una perspectiva de la metodología seguida durante la investigación para llegar al resultado buscado.



## **CAPITULO 1: MARCO CONTEXTUAL**

La corrosión ambiental representa uno de los mayores problemas a nivel industrial, debido a que produce un desgaste significativo en las estructuras metálicas que se encuentran en contacto con el ambiente y los cambios que se dan en este conforme a las diferentes épocas del año. Es por ello que se tiene la necesidad de medir el avance de la corrosión para poder prolongar la vida útil de los materiales metálicos. Para lograr este propósito se tomarán en cuenta factores tales como la temperatura, el material metálico, humedad y otros factores ambientales; así como los aspectos técnicos y herramientas necesarias para la elaboración de la estación de monitoreo. En esta sección se presentará el marco contextual para la instalación de la estación de monitoreo; detallando las características del lugar escogido para la instalación de la misma.

### **1.1 Ubicación y contextualización.**

El proyecto de diseño e implementación de una estación de monitoreo del avance de la corrosión ambiental se realiza en el marco del curso de Introducción al Control de la Corrosión Industrial (ICCI), llevado a cabo durante el año 2021. La finalidad es poner en práctica el conocimiento adquirido durante el curso y contribuir al desarrollo de las herramientas necesarias en la Universidad de El Salvador para realizar estudios sobre el avance de la corrosión en el ambiente del campus.

#### **1.1.1 Contexto**

##### **a) Ubicación**

El proyecto se desarrollará en el campus de la Universidad de El Salvador específicamente en un terreno que se encuentra en la zona aledaña al estadio “Héroes y Mártires” perteneciente a la Facultad de Ingeniería y Arquitectura. En el proyecto estarán involucrados los estudiantes encargados de realizar la investigación, las autoridades de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura y una

institución externa que será la encargada de la construcción de la estructura una vez el diseño sea revisado y aprobado.

La Universidad de El Salvador se encuentra en el municipio de San Salvador en el departamento homónimo, dicho municipio es la capital del país y se encuentra en la zona central del país a una altura media de 658 m, ubicándose el campus en la zona norte del municipio en el límite con el municipio de Mejicanos. En la figura 1.1 se tiene una vista satelital de la ubicación de la Universidad de El Salvador.



*Figura 1.1: Ubicación de la Universidad de El Salvador. (Google maps)*

#### **a. Aspectos históricos.**

La Universidad de El Salvador fue fundada el 16 de febrero de 1841, por medio de un decreto emitido por la Asamblea Constituyente, que recién se había instalado, y suscrito por el diputado presidencial Juan José Guzmán y los diputados secretarios Leocadio Romero y Manuel Barberena. La orden de ejecución fue promulgada por Juan Lindo, quien gobernó el país en su carácter de jefe provisorio de Estado del 7 de enero de 1841 al 1 de febrero de 1842.

La ejecución del decreto de fundación corrió a cargo del jefe de sección encargado del Ministerio de Relaciones y Gobernación, quien dispuso su impresión, publicación y circulación. La UES inició sus actividades hasta 1843 impartiendo matemáticas puras, lógica, moral, metafísica y física general. En 1880, se

subdividió en facultades, algunas de las cuales desaparecieron tiempo después, mientras que otras nuevas fueron creadas.

La UES ha desempeñado un papel protagónico en el desarrollo de la sociedad salvadoreña en los ámbitos educativo, social, económico y político. Tiene como propósito ser transformadora de la educación superior, fomentar el desarrollo de la conciencia crítica y propositiva de la sociedad salvadoreña, a través de la integración de sus funciones básicas: la docencia, la investigación y la proyección social.

### b) Clima

El clima del municipio de San Salvador, donde se encuentra ubicado el proyecto, tiene un clima cálido todo el año; siendo diciembre, enero y febrero los más frescos. Las temperaturas se mantienen entre los 18 y 33 grados centígrados. Los más calurosos son de marzo a mayo. De mayo a octubre es la estación lluviosa, usualmente se producen inundaciones (sobre todo en los ríos). [19]

La temperatura varía entre el mediodía y la medianoche, debido a cambios en los niveles de humedad. La temperatura más alta registrada en San Salvador fue de 38,5 °C, la más baja fue de 4,0 °C [19]. En la figura 1.2 se aprecia de forma gráfica la variación de las condiciones ambientales de San Salvador a lo largo del año.

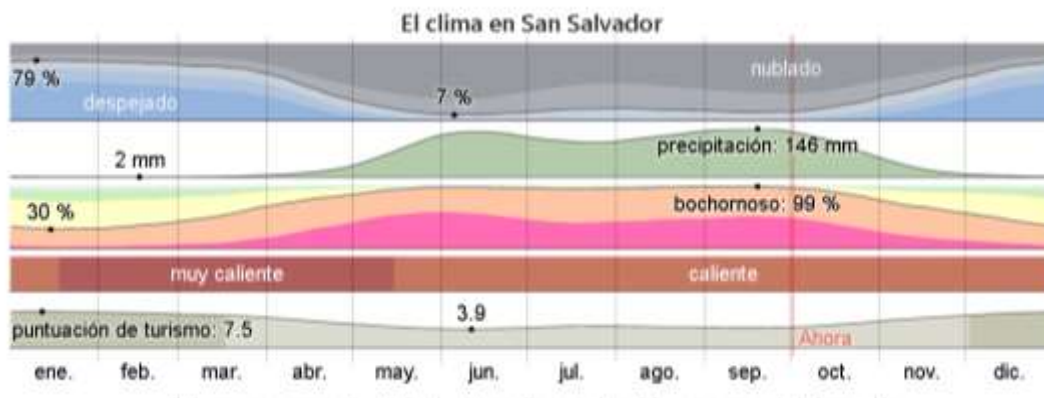


Figura 1.2: El Clima de San Salvador. [22]

En la Sección 2.3 se presenta un mayor detalle del lugar seleccionado.

### **c) Situación actual**

El estudio de la corrosión en general en el campo de la ingeniería química, se desarrolla de manera teórica y experimental, esta última, se realiza exclusivamente en las instalaciones de la Planta Piloto, ya que a fecha de hoy no se cuentan con otras estructuras para realizar pruebas experimentales a tiempos más prolongados o realizar estudios más complejos.

El campo de la corrosión es muy importante en el estudio de la ingeniería química y ha ganado relevancia en los últimos años a medida las nuevas tecnologías se desarrollan y la necesidad de tener expertos de este tipo crece, por lo cual es importante brindar las herramientas necesarias para el desarrollo del conocimiento experimental en este campo; anteriormente no se tiene conocimiento de proyectos previos para implementar estructuras que ayuden a llevar a cabo este fin.

### **1.2 Objetivos**

#### **1.2.1 Objetivo General:**

- Diseñar e implementar de una estación de monitoreo de la corrosión ambiental en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador.

#### **1.2.2 Objetivos Específicos:**

1. Identificar los factores específicos que afectan la velocidad de corrosión ambiental en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura.
2. Elaborar un presupuesto para la implementación de una estación de monitoreo.
3. Desarrollar los procedimientos o normativas para medir el avance de la corrosión ambiental en estaciones de este tipo.
4. Establecer los criterios para el monitoreo de la corrosión ambiental.

### **1.3 Justificación**

Es importante contar con las herramientas técnicas necesarias para aplicar y enriquecer el conocimiento teórico adquirido sobre el fenómeno de la corrosión, con lo cual, una estructura que permita diversificar las maneras de experimentar generaría un impacto positivo en el desarrollo de la carrera para los estudiantes de la carrera de Ingeniería Química.

Desde el punto de vista profesional, el desarrollo de nuevas tecnologías para prevenir la corrosión y el aumento de expertos en este campo, prometen una oportunidad de desarrollo profesional para los estudiantes en el futuro y es de máxima importancia conocer el modo en que se trabaja esto en el mundo real; el clima tropical del país, además nos permite conocer de primera mano un ambiente que suele afectar de gran manera a las estructuras y con datos reales obtenidos bajo este tipo de ambiente durante el desarrollo estudiantil, la capacidad de gestionar y resolver problemas de la misma índole en el mundo profesional se vería facilitada.

De esta manera el proyecto de implementación de una estación de monitoreo de la corrosión ambiental dentro de la facultad, abriría una ventana de posibilidades a aprovechar tanto en el presente como en el futuro de los estudiantes y profesores de la carrera. Inclusive, podría usarse para colaborar con instituciones externas en estudios en el campo de la corrosión y permitir la generación de nuevos lazos de cooperación entre la universidad y estas instituciones externas, lo cual, traería oportunidades profesionales para los estudiantes.

### **1.4 Resultados esperados de la implementación de la estación de monitoreo.**

Una vez realizada la implementación de esta estación permitirá que los estudiantes puedan afianzar su conocimiento en el campo de las pruebas de corrosión ambiental, dándole el uso adecuado y utilizando experimentos creativos. De esta forma equilibrar la brecha entre el conocimiento teórico adquirido en las sesiones de clases y la cantidad de horas prácticas realizadas sobre el tema.

También se espera que los estudiantes puedan tener acceso a mejores oportunidades profesionales en el futuro al contar con el conocimiento adecuado en el rubro.

## **1.5 Delimitación y Limitaciones**

### **a) Delimitación del proyecto**

En el contexto de la implementación de una estación de monitoreo de la corrosión ambiental, el eje central es la falta de una estructura que permita caracterizar el efecto sobre los materiales del ambiente universitario.

Ante esto, se vio la oportunidad a través del curso de ICCI, de aprovechar el espacio físico disponible dentro de la facultad para introducir esta estación como una estrategia para poder adquirir conocimiento acerca del efecto que tiene el ambiente sobre las estructuras, así como caracterizarlo de manera adecuada; es así como se diseñó esta estructura y se hacen las gestiones respectivas con las autoridades del alma mater y de terceros para poder hacer realidad este proyecto; además de la implementación de la estación, también se diseñó una metodología para su uso adecuado en el futuro.

### **b) Limitaciones del proyecto**

1. La caracterización del ambiente no aplica a otras zonas geográficas del país, por lo que será necesario caracterizar de nuevo el ambiente si se desea implementar y recabar información con una estructura de este tipo en otra zona del país.
2. El proyecto se enfoca en el diseño e implementación de la estructura y el diseño de una metodología para utilizarla, sin embargo, no se ha caracterizado el tipo de corrosión esperado esto se deberá determinar mediante la interpretación de los resultados de los experimentos realizados con la estructura.
3. Las restricciones vigentes para prevenir el COVID-19 hicieron que el desarrollo físico de la estructura tuviera que hacerse en un tiempo más dilatado al previsto.

## CAPITULO 2: MARCO TEORICO

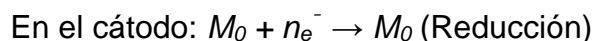
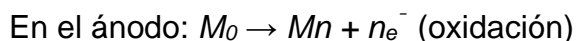
La corrosión ambiental es uno de los desafíos más grandes a superar para las industrias desde que esta se empezó a desarrollar unos siglos atrás, los diversos tipos de ambientes alrededor del mundo causan daños igualmente diferentes por lo que es importante caracterizar el tipo de ambiente y daño que este puede causar para así poder contenerlo o corregirlo según el caso. En esta sección se profundizará el tema de la corrosión y por qué es importante su conocimiento y la aplicación de este a nivel industrial.

### 2.1 Corrosión

La Corrosión es un término que se utiliza para describir el proceso de deterioro de materiales metálicos (incluyendo tanto metales puros, como aleaciones de estos), mediante reacciones químicas y electroquímicas. [13]

Estos materiales metálicos son obtenidos a través del procesamiento de minerales presentes en la naturaleza, induciéndolos a un estado de mayor energía. El fenómeno de la corrosión ocurre debido a que, con el tiempo, dichos materiales tienen la tendencia de regresar a su estado natural, el cual constituye un estado energético de menor potencial, lo que les permite estabilizarse termodinámicamente. [6]

La mayoría de procesos de corrosión involucran reacciones de reducción-oxidación (reacciones electroquímicas), donde, para que se desarrollen estos procesos, es necesaria la existencia de tres constituyentes: (1) unos electrodos (un ánodo y un cátodo), (2) un electrolito, como medio conductor, que en la mayoría de casos corresponde de una solución acuosa, y (3) una conexión eléctrica entre los electrodos. [3] La Figura 2.1 muestra de forma representativa un esquema de estos elementos, formando lo que se conoce como una celda electroquímica. Las ecuaciones de las reacciones que ocurren en los electrodos son las siguientes:



En la figura 2.1 se tiene una representación gráfica de los elementos de una celda electroquímica.

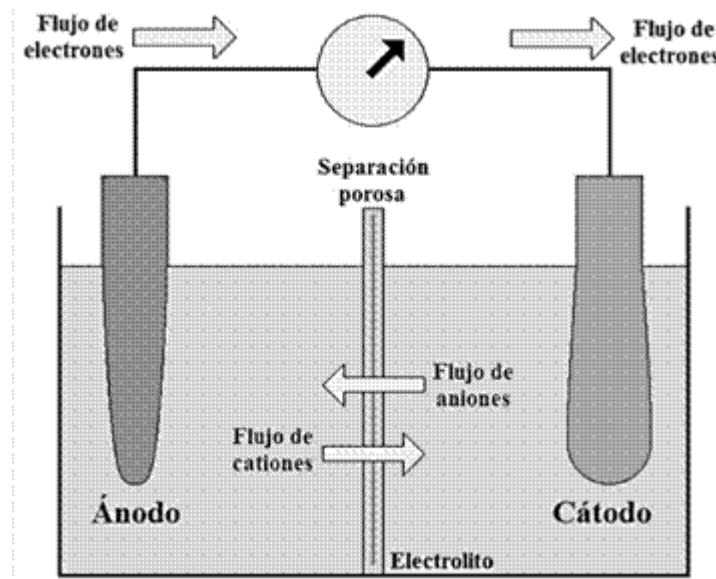


Figura 2.1: Representación de una celda electroquímica. [3]

El potencial electroquímico define la susceptibilidad o la resistencia de un material metálico a la corrosión, cuyo valor varía en dependencia de la composición del electrolito. Cuanto más positivo sea el valor de dicho potencial, más noble (resistente) es el material. Mientras que, cuanto más negativo sea este, más reactivo es el material a la corrosión.

La serie galvánica consiste en una tabla donde se ubican diferentes tipos de materiales respecto al potencial electroquímico de estos. La Figura 2.2 muestra representativamente una tabla de serie galvánica para algunos metales y aleaciones comunes.





Figura 2.2: Serie galvánica para algunos metales y aleaciones comunes. [3]

Ambas reacciones ocurren de forma simultánea. Como se observa en las ecuaciones, el ánodo cede electrones al sistema cuando reacciona, aumenta su número de oxidación, cambiando de su estado metálico base a cationes que se disuelven en el electrolito, siendo este el material que sufre el fenómeno de corrosión; mientras que, en el cátodo, los aniones metálicos absorben electrones, disminuyendo su número de oxidación, por lo que cambian a su estado base. [3]

Los productos que se forman a partir del proceso de corrosión, sobre la superficie del material, pueden afectar de manera negativa o positiva, las propiedades del material, según la naturaleza y las condiciones que lo rodean. [3]

### 2.1.1 Tipos de corrosión

Existen muchos tipos de procesos de corrosión diferentes que se caracterizan según tanto de la naturaleza del material y de las condiciones del medioambiente, donde se desarrollen. Una forma común de clasificación de los tipos de corrosión es mediante las siguientes cuatro categorías: corrosión generalizada, corrosión localizada, corrosión combinada con un fenómeno físico, y otros tipos. En la figura 2.3 se tiene una representación a nivel microscópica de cómo se ve afectado el metal dependiendo del tipo de corrosión.

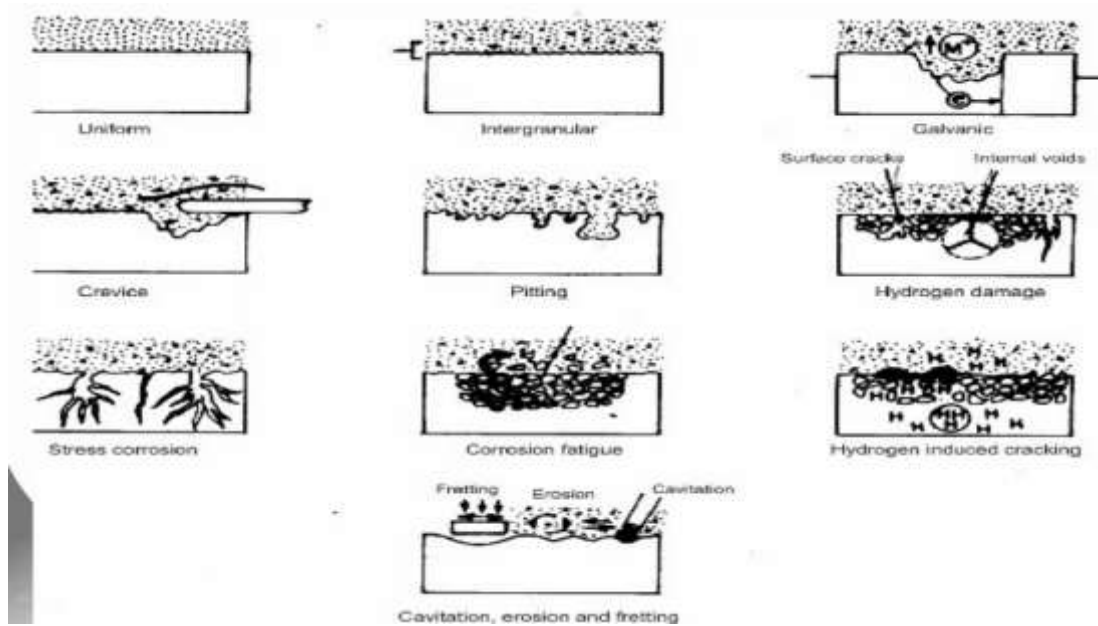


Figura 2.3: Tipos de Corrosión. [5]

a. **Corrosión uniforme:** Es la forma más común de corrosión, la cual se caracteriza por ser una reacción química o electroquímica que se produce de manera homogénea en toda la superficie expuesta a un tipo de atmosfera. Este tipo de corrosión es responsable de la mayor pérdida de material, tanto que puede provocar un adelgazamiento severo que muchas veces tiende a llegar a ser causa de falla de una pieza. En la Figura 2.4,  $\Delta S$  indica la cantidad de material que se perdió debido a este tipo de corrosión. [14]

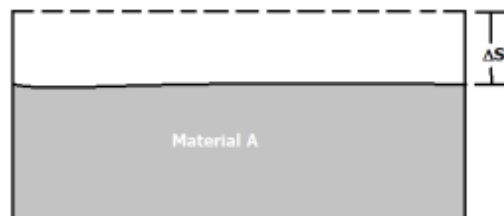
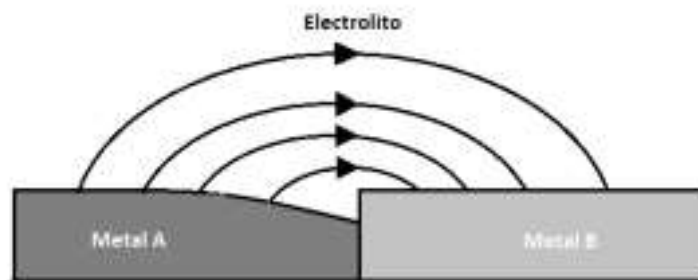


Figura 2.4: Representación de la Corrosión Uniforme. [21]

**b. Corrosión Galvánica:** Se da principio ante el contacto de dos materiales y la existencia de un electrolito, forman una celda electroquímica donde el material de menor potencial electroquímico es el que se corroe. Se presenta entre dos metales distintos, como se mencionó en la sección 2.1, depende del potencial de cada uno de los materiales que están en contacto (Tabla de potenciales estándar). [14] En la figura 2.5 se tiene la representación de una celda electroquímica entre dos metales A y B inmersos en un electrolito, propiciando así la corrosión del metal con menor potencial electroquímico.



*Figura 2.5: Proceso de corrosión galvánica. [21]*

**c. Corrosión intergranular:** Es un proceso de corrosión galvánica que sucede en el límite del grano; esto debido a la sensibilización de la pieza. La sensibilización del material suele ocurrir cuando este es sometido a una elevada temperatura o es expuesto a largos periodos de temperaturas elevadas, lo que provocara que en el límite del grano se genere una nucleación de precipitados y con ello, pequeñas celdas galvánicas entre el límite del grano y el grano, por la diferencia de potencial que existe. [14] En la figura 2.6 se tiene una representación de los límites de grano y el metal disuelto gracias a la corrosión.

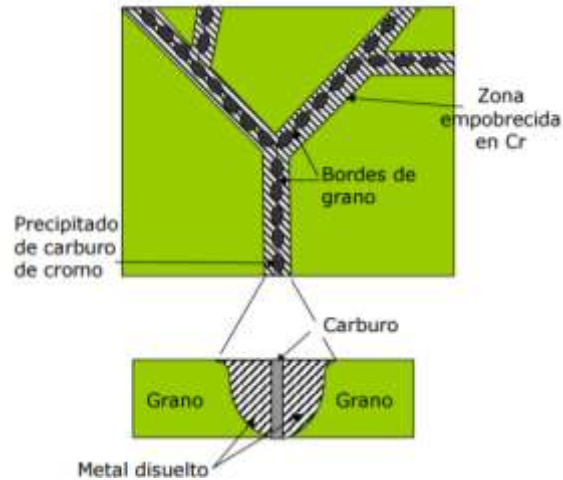


Figura 2.6: Representación de los límites de grano. [23]

En la figura 2.7 se ve representada la corrosión intergranular; cuando el metal se encuentra disuelto debido a las condiciones de temperaturas elevadas prolongadas, se forman grietas. A medida que la corrosión avanza, las grietas se expanden en el material frágil.

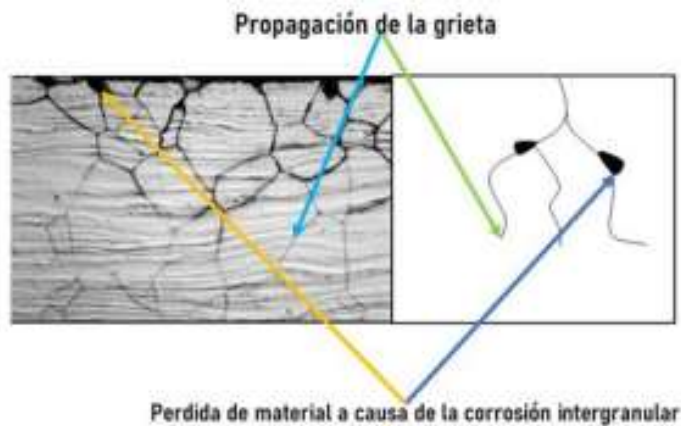


Figura 2.7: Representación de la propagación de la grieta. [21]

**d. Corrosión por picaduras:** Es un proceso electroquímico de oxidoreducción que ocurre en agujeros localizados, llamados células, en la superficie de metales cubiertos por una capa pasivada. La corrosión por picadura es un sistema de corrosión extremadamente localizado que genera agujeros en el metal. [17] En la figura 2.8 se tiene una célula en la superficie de una lámina de acero

inoxidable que presenta corrosión por picaduras; si ésta avanza lo suficiente, puede provocar un agujero en la lámina.

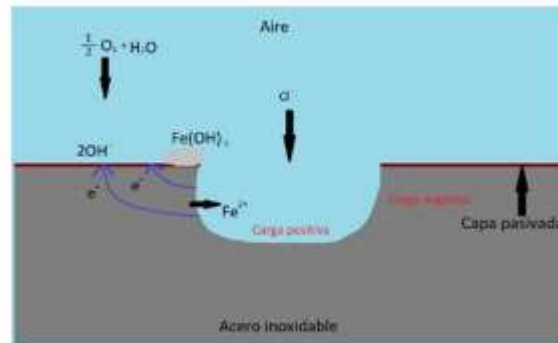


Figura 2.8: Diagrama de crecimiento de picadura. [21]

**e. Corrosión por Cavitación:** La cavitación es un fenómeno en el que se forman pequeñas cavidades llenas de vapor en una superficie debido a los cambios rápidos de presión en lugares donde la presión es baja. La cavitación-corrosión es la combinación del deterioro de la superficie causado por la formación y colapso de burbujas en un líquido y de la corrosión. [14] En la figura 2.9 se representa el colapso de una burbuja de vapor, debido a los cambios en la presión a la que está expuesta, provocando un impacto en el metal, y con ello da inicio a la corrosión.

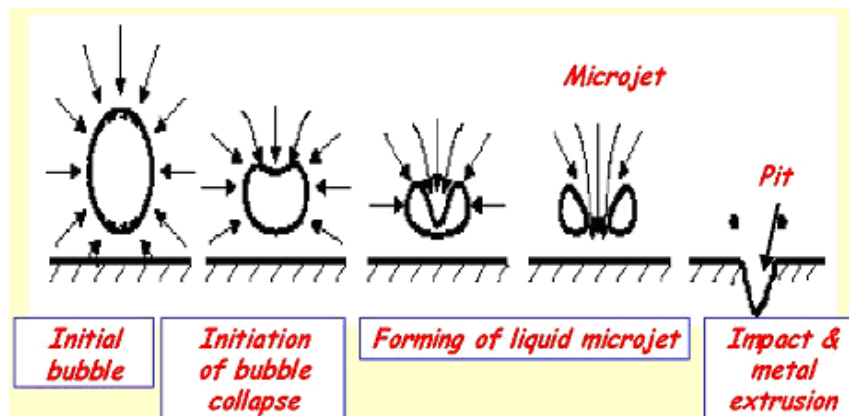


Figura 2.9: Colapso de una burbuja de vapor. [16]

En la figura 2.10 se puede apreciar cómo afecta el colapso de una burbuja de vapor en el metal.

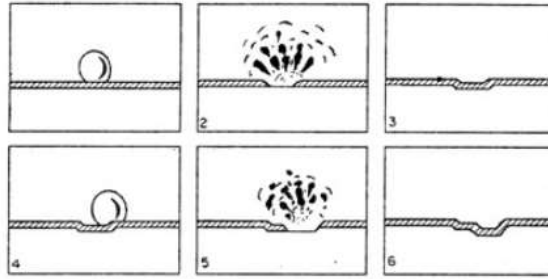


Figura 2.10: Mecanismo de acción de la corrosión por cavitación. [16]

**f. Corrosión por esfuerzo:** Es un proceso complejo debido a que se generan grietas en el material lo que provocara que la vida útil de la pieza disminuya. Este tipo de corrosión es complejo, ya que existen muchos factores que interactúan para generar este tipo de corrosión, por ejemplo, los materiales (acabado superficial, tratamiento térmico), el ambiente (Interacciones ambientales con la pieza), y los esfuerzos (variables mecánicas que están en contacto con el material). La corrosión por tensión se genera únicamente cuando se combinen los tres factores antes mencionados. [14] En la figura 2.11 se tiene una pieza metálica con grietas generadas por la corrosión por esfuerzo.

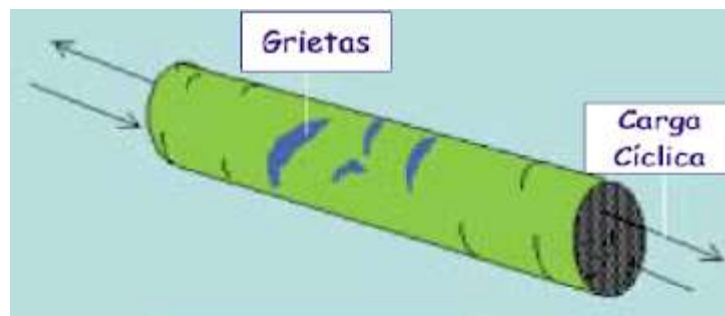


Figura 2.11: Grietas generadas por corrosión por esfuerzo. [8]

**g. Corrosión bacteriana:** La Corrosión biogénica involucra un complejo ecosistema que se alimenta de los nutrientes que se encuentran en las aguas servidas sépticas. La "productividad" de este ecosistema depende de las condiciones ambientales (temperatura ambiente, humedad relativa, tiempo de retención en el alcantarillado, etc.); cuanto más favorables son las condiciones, mayor es la producción de ácido sulfúrico. Este tipo de corrosión se da en los siguientes pasos: 1) Producción de  $H_2S$ ; 2) liberación del  $H_2S$ ; 3) Alimentación de

las bacterias acidófilas, el  $H_2S$  se descompone en azufre elemental, estas bacterias se alimentan con el azufre producido formando  $H_2SO_4$  como producto metabólico. Reduciendo el pH de la biopelícula y corroyendo el metal; 4) Aumento de la concentración de Thiobacillus Thiooxidans, haciendo que la velocidad de corrosión aumente. [17] En la figura 2.12 se tiene la representación del crecimiento bacteriano en una alcantarilla.

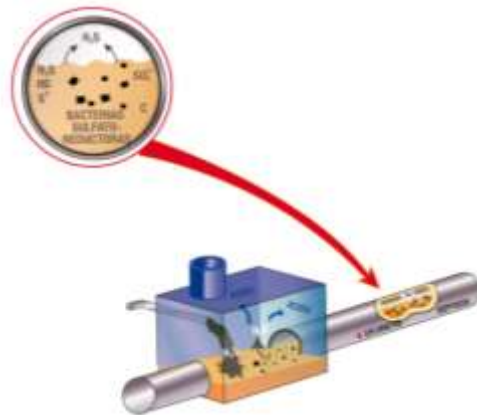


Figura 2.12: Corrosión bacteriana. [18]

**h. Corrosión por hidrógeno:** Se produce cuando el hidrógeno entra en la estructura como defecto intersticial; es decir, en una primera etapa, el hidrógeno quedará en la superficie del componente metálico y después de un tiempo se introducirá en el componente metálico debido a la absorción de este, esto causará fracturas, esfuerzos residuales y obstáculo en el movimiento de dislocaciones. [5] En la figura 2.13 se tiene un esquema de cómo el hidrógeno penetra en los intersticios de una lámina de metal, produciendo corrosión por Hidrógeno.

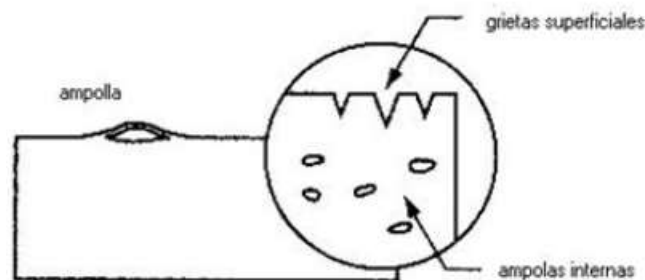


Figura 2.13: Esquema de la corrosión por Hidrógeno. [5]

**i: Corrosión por erosión:** Es el deterioro de un metal debido al movimiento de un fluido. Se presenta por un ataque combinado: ataque químico y mecánico. El fluido actúa como agente corrosivo y con su movimiento se genera un mecanismo de desgaste abrasivo, es por ello que este tipo de corrosión causa el desgaste de las piezas de forma rápida en comparación con otras. [6] En la figura 2.14 se representa el desgaste producido en un metal por un fluido en movimiento.

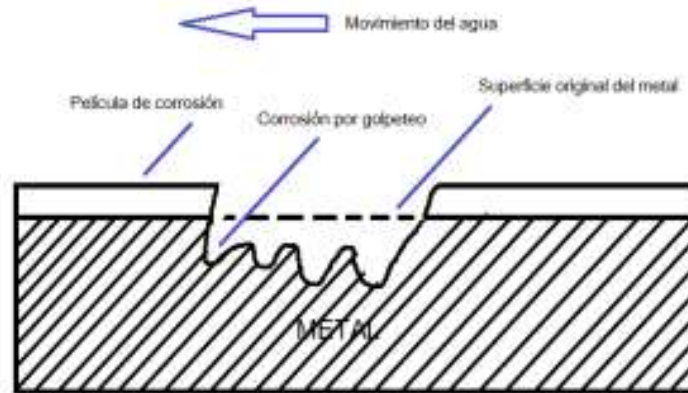


Figura 2.14: Corrosión por erosión. [21]

En la figura 2.15 se tiene el mecanismo de la corrosión por erosión. En ésta, el fluido se recircula en pequeñas imperfecciones en la superficie, que pueden ser producto del acabado del metal. A medida que el fluido se recircula, el desgaste en el metal aumenta.

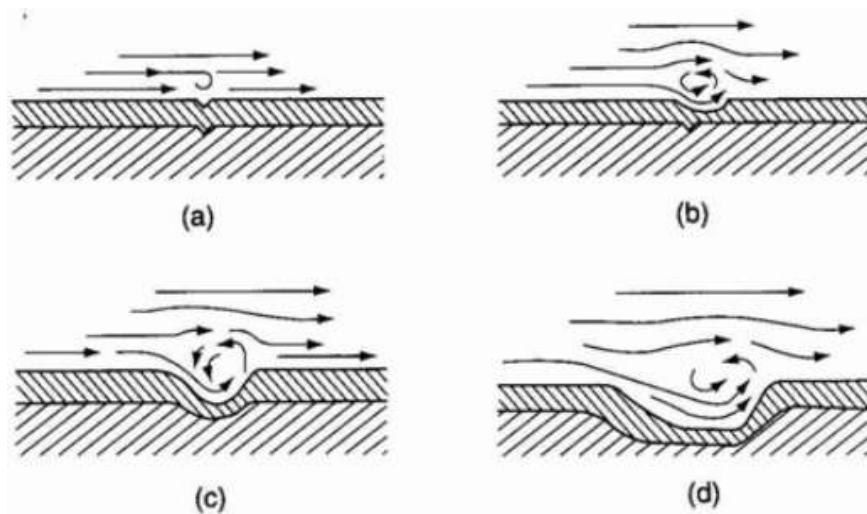
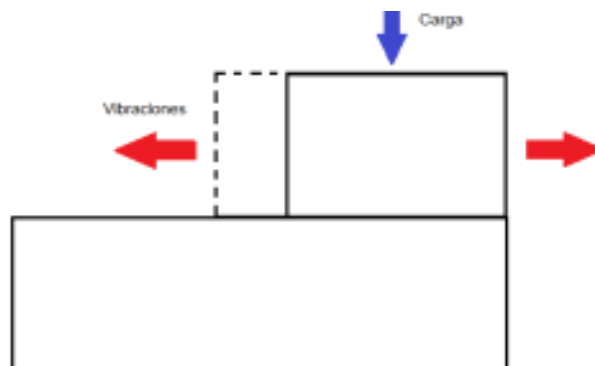


Figura 2.15: Mecanismo esquemático de la corrosión por erosión [7]



**j. Corrosión por desgaste:** Se trata de una corrosión localizada que ocurre en el área de contacto entre materiales bajo carga mecánica y sujetos a vibraciones y a desplazamientos: se forman picaduras y rayas en el material, rodeando de productos de corrosión. [21] En la figura 2.16 se representa el desgaste por fricción de dos metales, generando rayas y dando oportunidad a la corrosión por desgaste.



*Figura 2.16: Mecanismo de la corrosión por desgaste. [21]*

### **2.1.2. Factores que influyen en el proceso de corrosión**

Existen muchos factores que influyen en el proceso de corrosión, donde se debe tomar en cuenta tanto las características del material sobre el que incide y el medio que rodea a este. A continuación, se mencionan algunos factores como los de mayor efecto sobre el proceso corrosivo. [17]

#### **a. Acidez de la solución**

El pH de una solución es una propiedad que define la cantidad de iones de hidrógeno libres en dicha solución. Si el pH es menor a 7 ( $\text{pH} < 7$ ) se dice que la solución es ácida. Esto significa que existe una concentración relativamente alta de iones hidrógeno libres en la solución, los cuales son capaces de recibir electrones para poder estabilizarse. [17]

Debido a la capacidad de aceptar electrones, las soluciones ácidas son más corrosivas que las soluciones tanto neutrales ( $\text{pH} = 7$ ) como alcalinas ( $\text{pH} > 7$ ) [6],

ya que permiten que la zona anódica reaccione en mayor proporción, ya que se liberan electrones de tales reacciones. [17]

#### **b. Sales disueltas**

Las sales ácidas, al diluirse en la solución electrolítica, disminuyen su pH, acelerando el proceso de corrosión por el efecto de acidez. Algunos ejemplos de sales ácidas son, el cloruro de aluminio, el cloruro de hierro y el cloruro de amonio. [20]

Por otro lado, las sales alcalinas incrementan el pH de la solución electrolítica, por lo que, en algunos casos funcionan como inhibidores del proceso de corrosión. Ejemplos de estas sales son el fosfato trisódico, tetra borato de sodio, silicato de sodio y el carbonato de sodio. [20]

#### **c. Capas protectoras**

La tendencia a la corrosión de un material se puede reducir con la existencia de capas que protejan su superficie. Estas capas pueden ser aplicadas artificialmente, en forma de recubrimientos; o pueden aparecer a través del fenómeno de pasividad, formándose capas de óxidos metálicos que impiden el avance del proceso corrosivo. [20]

#### **d. Concentración de oxígeno**

La concentración de oxígeno en el medio electrolítico puede acelerar o retardar el proceso de corrosión, dependiendo de la naturaleza del material. [20] Para el caso de materiales ferrosos, al aumentar la concentración de  $O_2$ , aumenta la velocidad de corrosión pues el producto corrosivo no protege al material. Mientras que para materiales pasivables, cuan mayor sea la concentración de  $O_2$ , mayor capacidad tendrá el material de formar la capa protectora que lo caracteriza. [17]

#### **e. Temperatura**

La velocidad de corrosión tiende a aumentar al incrementar la temperatura, debido a que se acelera la difusión del oxígeno del medio hacia el material afectado, inclusive a través de capas de pasivación, fragilizando a este. Experimentalmente

se ha demostrado que un aumento en la temperatura de 2 °C, incrementa al doble la tasa de corrosión, aproximadamente. [20] La temperatura, representa el factor más importante para el desarrollo del proceso de corrosión por oxidación, como se mencionó con anterioridad.

#### **f. Velocidad de flujo**

En sistemas de transporte de fluidos, al aumentar la velocidad de flujo del medio, por lo general, aumenta la tasa de corrosión, debido a que: (1) permite a las sustancias corrosivas alcanzar y atacar zonas aún no afectadas, y (2) evita en cierta medida la formación y / o acumulación de capas resistentes a la corrosión que protejan al material por efecto erosivo. [20]

### **2.2 Corrosión ambiental**

La corrosión atmosférica es definida como la degradación de un material expuesto al aire y sus contaminantes en vez de estar sumergido en un líquido. Esta ha sido identificada y reportada como una de las formas más antiguas de la corrosión, para contar con más fallas en términos de costos y tonelaje que algún otro ambiente particular. [19]

Se puede considerar a la corrosión atmosférica metálica como una forma o tipo de corrosión que resulta de la interacción entre una atmósfera natural y un material metálico expuesto en la misma. Por atmósfera natural debe entenderse tanto la propia del exterior como del interior de lugares bajo abrigo las características físicas más importantes de una atmósfera natural son la temperatura, por lo general comprendida en el intervalo de -20 a 60°C, y el grado de humedad relativa (HR), normalmente entre 20 y 100%. [19]

Los factores determinantes en la corrosión en metales y aleaciones es la composición química del ambiente al que están expuestos y su propia naturaleza electroquímica. [19]

La acción conjunta de los factores de contaminación y los meteorológicos determinan la intensidad y naturaleza de los procesos corrosivos, y cuando actúan

simultáneamente, aumentan sus efectos. También es importante mencionar otros factores como las condiciones de exposición, la composición del metal y las propiedades del óxido formado, que, combinados entre sí, influyen en los procesos de corrosión. [19]

### 2.2.1 Influencia de las condiciones ambientales en la corrosión

El factor ambiental más directamente relacionado con los procesos de corrosión es la humedad que este presenta, ya que es el origen del electrolito que está presente en el circuito de corrosión.

El electrolito es una capa de humedad sobre la superficie del metal cuyo espesor varía desde capas muy delgadas (invisibles) hasta capas que mojan perceptiblemente el metal. La duración del proceso de corrosión depende sobre todo del tiempo durante el cual la capa de humedad permanece sobre la superficie metálica.

Como el mecanismo de corrosión es electroquímico, su característica principal es la presencia de un proceso anódico y otro catódico, con un electrolito de resistencia óhmica determinada. [4]

En el proceso anódico el metal se disuelve en la capa del electrolito, en la cual la concentración se eleva hasta la precipitación de un compuesto poco soluble. En el proceso catódico, bajo la capa de humedad, la mayoría de los metales expuestos a la atmósfera se corroen por el proceso de reducción de oxígeno. [4]

La resistencia óhmica entre las zonas anódica y catódica de las minúsculas pilas de corrosión que se distribuyen sobre el metal es grande cuando el espesor de la capa de humedad es pequeño. [4]

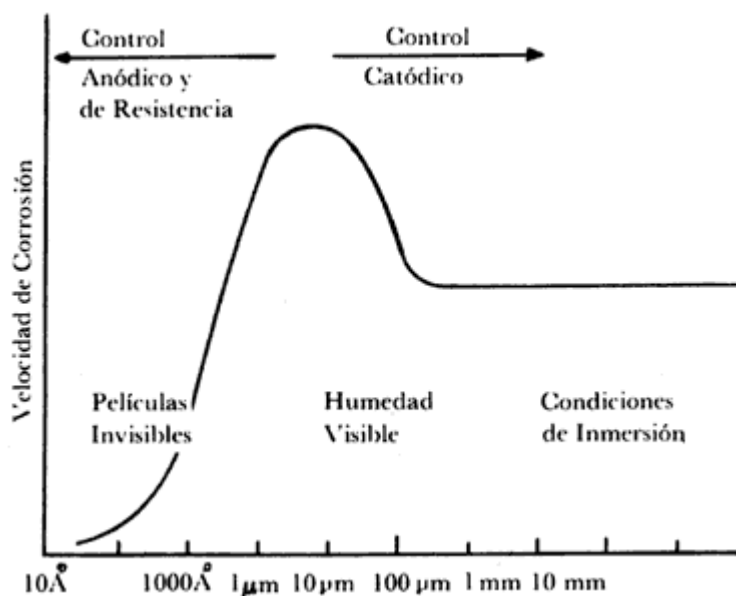
La corrosión atmosférica puede ser clasificada en:

**a) Corrosión seca.** Se produce en los metales que tienen una energía libre de formación de óxidos negativa. [9]

**b) Corrosión húmeda.** Requiere de la humedad atmosférica, y aumenta cuando la humedad excede de un valor crítico, frecuentemente por encima del 70%. [9]

**c) Corrosión por mojado.** Se origina cuando se expone el metal a la lluvia o a otras fuentes de agua. [9]

La figura 2.17 muestra la relación que existe entre la corrosión atmosférica y el espesor de la capa del electrolito sobre la superficie metálica. Se observa que en espesores pequeños la corrosión no existe, pues la resistencia óhmica de la capa del electrolito sobre la superficie metálica es muy grande y la disolución del metal es difícil. [4]



*Figura 2.17: Relación entre corrosión ambiental y espesor de la capa del electrolito sobre la superficie metálica. [4]*

Al aumentar el espesor de la capa podemos ver que disminuye la resistencia del electrolito y la polarización catódica y esto provoca que la velocidad de corrosión empiece a aumentar hasta llegar a su máximo, que disminuye después con el aumento del espesor. En esta zona, la reacción catódica es determinante en el proceso de corrosión, el factor óhmico y la polarización anódica pierden importancia, pues la difusión de oxígeno en la superficie metálica es muy lenta y por tanto determinante del proceso global. [4]

Esto nos permite comprobar la importancia del conocimiento de las causas y los factores que influyen en la formación de películas de humedad sobre la superficie

metálica. La causa más importante es la precipitación atmosférica (en forma de lluvia o niebla espesa). [4]

Se puede considerar que bajo una humedad relativa menor al 60% se tiene niveles de corrosión que pueden llegar a ser insignificante si suponemos que la atmósfera al que están expuestos los materiales es únicamente aire puro. La situación cambia cuando la atmósfera a la que están expuestos los materiales está contaminada por emisiones de la quema de combustibles fósiles.

La humedad relativa se define como la cantidad de vapor de agua presente en el aire, es decir, es la cantidad de vapor de agua que se puede mantener en el aire sin que se convierta a rocío a una temperatura dada, y el requisito fundamental para que exista un proceso de corrosión atmosférica es la presencia de una fina película de electrolito, con un espesor de 10 a 50  $\mu\text{m}$ , que se puede formar en la superficie metálica cuando se expone a un nivel crítico de humedad. Causando el efecto en el metal debido al fenómeno visto anteriormente.

Existe una gran cantidad de contaminantes que propician el fenómeno de la corrosión ambiental pero los más importantes son aquellos que se derivan de los combustibles como el dióxido de carbono, el sulfuro y la sal; aunque este último se propaga por medios naturales y se encuentra presente principalmente en ambientes marinos.

Existe también la condensación de humedad, que se origina cuando la humedad relativa de la atmósfera sobrepasa el 100%. Es importante mencionar también la condensación por adsorción, la condensación capilar y la condensación química. [4]

La temperatura es otro de los factores que influyen en la corrosión atmosférica. Si la temperatura va en incremento, los niveles de corrosión también pueden llegar a duplicarse. También el efecto de la temperatura se refleja entre la superficie metálica y el ambiente, ya que puede provocar el punto de condensación de la humedad presente en el ambiente

## 2.2.2 Tipos de la corrosión atmosférica

La corrosión atmosférica puede ser clasificada en:

**Corrosión atmosférica:** En ausencia de humedad, muchos metales se corroen muy lentamente a temperatura ambiente. Corrosión acelerada bajo condiciones secas se logran a temperaturas altas. Corrosión seca a temperatura ambiente ocurre sobre metales que tienen una energía libre negativa de formación de óxidos y entonces forman rápidamente una película estable termodinámicamente en presencia de oxígeno. Típicamente, esas partículas son deseables porque son libres de defectos, no porosas y actúan como una barrera protectora para aislar el metal base de los ataques corrosivos. Tales metales como aceros inoxidables, titanio y cromo desarrollan este tipo de películas protectoras. Películas porosas y no adherentes que se forman espontáneamente en metales no pasivos, por ejemplo, acero sin aleación, son normalmente no deseables. [15]

**Corrosión húmeda:** Requiere de humedad en la atmósfera y se incrementa su agresividad con el contenido de humedad. Cuando la humedad excede un valor crítico, el cual está alrededor del 70% de humedad relativa, una película delgada invisible de humedad se formará sobre la superficie del metal, proveyendo un electrolito para transferir corriente. El valor crítico depende de las condiciones de la superficie tal como limpieza, productos de corrosión formados o la presencia de sales u otros contaminantes que son higroscópicos y pueden absorber agua en humedades relativas muy bajas. [15]

**Corrosión mojada:** Ocurre cuando gotas de agua o películas de agua visibles son formadas sobre la superficie del metal debido a la brisa del mar, lluvia o caídas de rocío. Cuando la superficie es plana y ésta aparenta estar seca, grietas o trampas de condensación provocan encharcamiento de agua, lo cual conduce a que de la corrosión atmosférica mojada.

Durante la corrosión mojada, la solubilidad de los productos de la corrosión puede afectar la velocidad de corrosión. Típicamente, cuando el producto de corrosión es soluble, la velocidad de corrosión incrementará. Esto ocurre porque los iones disueltos normalmente incrementan la conductividad del electrolito y entonces

decrece la resistencia interna para el flujo de corriente, el cual dará un incremento en la velocidad de corrosión. Bajo condiciones alternas de mojado y seco, la formación de productos de corrosión insolubles sobre la superficie puede incrementar la velocidad de corrosión durante el ciclo de secado por absorción de humedad y continuamente mojada la superficie del metal. [15] La figura 2.20 representa el mecanismo de acción del electrolito en la corrosión.

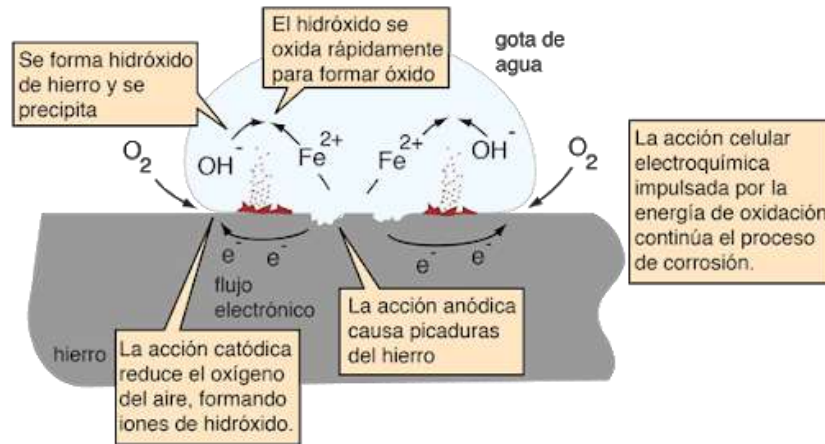


Figura 2.18: Acción del electrolito en la corrosión. (Hyperphysics, 2017).

### 2.2.3 Formas de la corrosión

Las diferentes formas de corrosión representan fenómenos categorizados de acuerdo con su apariencia. Se han considerado y dividido las formas básicas de corrosión en tres grupos, sobre la base de su identificación. En la figura 2.19 se presentan las categorías usadas y el grupo al cual pertenecen:



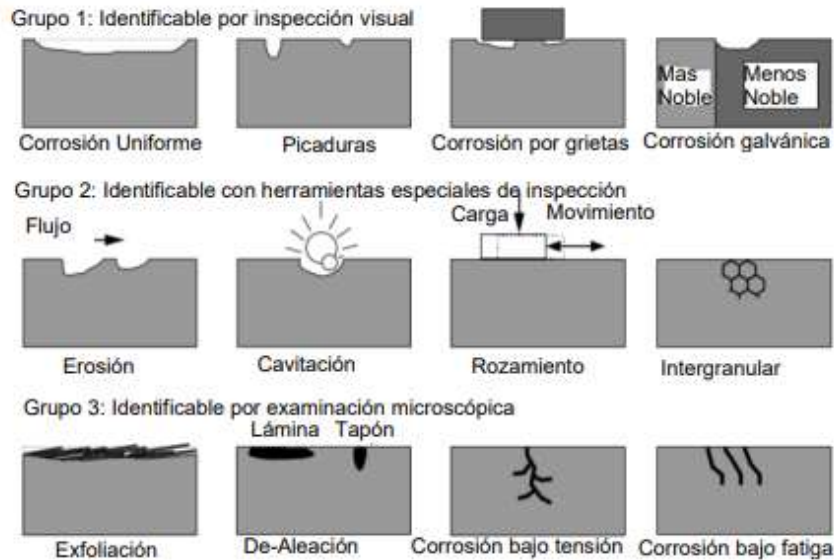


Figura 2.19: Categorías de la corrosión. [1]

#### 2.2.4 Contaminación de la atmósfera

Se entiende por contaminación atmosférica a la presencia en la atmósfera de sustancias en una cantidad que implique molestias o riesgo para la salud de las personas y de los demás seres vivos, vienen de cualquier naturaleza, así como que puedan atacar a distintos materiales, reducir la visibilidad o producir olores desagradables. El nombre de la contaminación atmosférica se aplica por lo general a las alteraciones que tienen efectos perniciosos en los seres vivos y los elementos materiales, y no a otras alteraciones inocuas. Los principales mecanismos de contaminación atmosférica son los procesos industriales que implican combustión, tanto en industrias como en automóviles y calefacciones residenciales, que generan dióxido y monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y azufre, entre otros contaminantes. Igualmente, algunas industrias emiten gases nocivos en sus procesos productivos, como cloro o hidrocarburos que no han realizado combustión completa. [2]

La contaminación atmosférica puede tener carácter local, cuando los efectos ligados al foco se sufren en las inmediaciones del mismo, o planetario, cuando por las características del contaminante, se ve afectado el equilibrio del planeta y zonas alejadas a las que contienen los focos emisores. [2]

Los contaminantes atmosféricos de mayor importancia son: partículas suspendidas totales, ozono, monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno, sulfuro de hidrógeno, dióxido de azufre y dependiendo del tipo de atmósfera cloruros. [2]

*Tabla 2.1: Valores de sustancias en el ambiente limpio y contaminado. [9]*

Componente	Aire Limpio (ppm)	Aire Contaminado (ppm)
SO <sub>2</sub>	0,001 – 0,01	0,02 – 2
CO <sub>2</sub>	310 – 330	350 – 700
CO	< 1	5 – 200
NO <sub>x</sub>	0,001 – 0,01	0,01 – 0,5
O <sub>3</sub>	0,02	0,5
N <sub>2</sub> O	0,25	?
NH <sub>3</sub>	0,01	0,02
Hidrocarburos	1,00	1 – 20
Partículas	10 – 20 µg/m <sup>3</sup>	70 – 700 µg/m <sup>3</sup>

El NaCl y el SO<sub>2</sub> son los principales contaminantes corrosivos de la atmósfera. La correlación entre los niveles de concentración de SO<sub>2</sub> o NaCl y la velocidad de corrosión es alta. También es importante mencionar al sulfuro de hidrógeno, que es el responsable del deslustre de cobre y plata, los compuestos nitrogenados que en solución incrementan la humedad en la superficie de los metales, las partículas inertes (silicio) y las partículas absorbentes (carbón de leña).

Entre todos estos contaminantes, el SO<sub>2</sub> tiene una importancia especial en los procesos de corrosión atmosférica, a causa de su incidencia directa en la velocidad de corrosión de los metales expuestos a la atmósfera.

Los metales no ferrosos consumen SO<sub>2</sub> en las reacciones de corrosión, y sus productos principales son los sulfatos metálicos, mientras que en la oxidación del hierro y del acero los sulfatos ferrosos son hidrolizados formando óxidos y generando ácido sulfúrico.

Una característica importante del SO<sub>2</sub> es que es más soluble que el oxígeno, lo cual origina que cuando se producen concentraciones muy bajas en la atmósfera pueden obtenerse películas de humedad sobre la superficie metálica con altas concentraciones de SO<sub>2</sub>, lo cual ocasiona el deterioro de la misma.

### **2.2.4.1 Ciclo del azufre atmosférico.**

Descrito de forma simple, el ciclo del azufre comienza en la litosfera: la corteza superficial del planeta Tierra. Los sulfatos son sales o ésteres que están presentes en el suelo. Los sulfatos también están disueltos en las aguas. [10]

- a) Las plantas absorben los sulfatos del suelo a través de sus raíces y los incorporan a su sustancia vegetal. Ellas reducen los sulfatos a sulfuros.
- b) Una vez en la estructura vegetal, el azufre puede pasar a través de los seres vivos en las cadenas alimentarias de la naturaleza.
- c) Los animales herbívoros se alimentan de las plantas e incorporan el azufre en su cuerpo.
- d) Los carnívoros se alimentan de los herbívoros, así que la carne de estos, que ya contiene azufre, pasa a su propio cuerpo para contribuir a su funcionamiento.
- e) Cuando los animales mueren, los cuerpos echados en el suelo son aprovechados por organismos descomponedores, tales como bacterias y hongos. Estos desintegran los cadáveres y la materia queda reducida a partículas orgánicas. Como el azufre está presente en algunos aminoácidos del cuerpo, las bacterias del suelo lo convierten en sulfuro de hidrógeno que se oxida para producir sulfato; así, los sulfatos vuelven al suelo y el ciclo se completa para volver a empezar. Lo mismo ocurre con las heces de los animales, pues también son descompuestas. Parte del azufre elemental puede incorporarse a las rocas.

El sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ) es un compuesto gaseoso que es liberado durante poco tiempo a la atmósfera como resultado de la actividad de bacterias que viven en el suelo y en el agua. Las erupciones volcánicas, los incendios y la quema de combustibles fósiles son otras fuentes de sulfuro de hidrógeno que se eleva a la atmósfera. Justo en la atmósfera el sulfuro de hidrógeno entra en contacto con el

oxígeno y se oxida, lo que produce sulfatos que caen al suelo y al agua por acción de la lluvia.

#### **2.2.4.2 Influencia del azufre en el proceso de corrosión.**

El depósito de SO<sub>2</sub> y de partículas salinas sobre las superficies metálicas acelera la corrosión al dar lugar a productos de corrosión solubles en vez de los escasamente insolubles que se forman en agua pura. Según Schikorr, la capa de 20 herrumbre del acero absorbe el SO<sub>2</sub> tan rápido como si fuese un papel absorbente en álcali y este proceso continúa casi independiente de la humedad relativa o la temperatura. Sin embargo, solo cuando la HR es suficientemente alta (70 - 80%), el SO<sub>2</sub> absorbido acelera el proceso de corrosión [10]

#### **2.2.4.3 Efecto de la lluvia ácida**

El retorno a la superficie de la tierra de los contaminantes atmosféricos se realiza de dos formas distintas: por depósito seco y por depósito húmedo. La oxidación del dióxido de azufre y la incorporación de ácido sulfúrico en las gotas de niebla pueden aumentar la acidez de las precipitaciones de la misma forma en que lo hacen la oxidación y la separación de los óxidos de nitrógeno, de manera que las regiones con altos niveles de óxidos de azufre y de nitrógeno tienen con cierta frecuencia lluvias ácidas. [10]

La lluvia normal, no contaminada, tiene un pH de aproximadamente 5.6, acidez debida a la presencia de ácido carbónico, formado en la atmósfera por combinación del bióxido de carbono y el agua. [10]

La lluvia ácida se caracteriza por un pH inferior a 5.6 y contiene pequeñas pero significativas cantidades de ácido sulfúrico y ácido nítrico. Sus efectos sobre el ecosistema terrestre son muy importantes, y uno de los más agresivos es el de la corrosión de los metales. [10] En la figura 2.20 se representa el ciclo del Azufre.

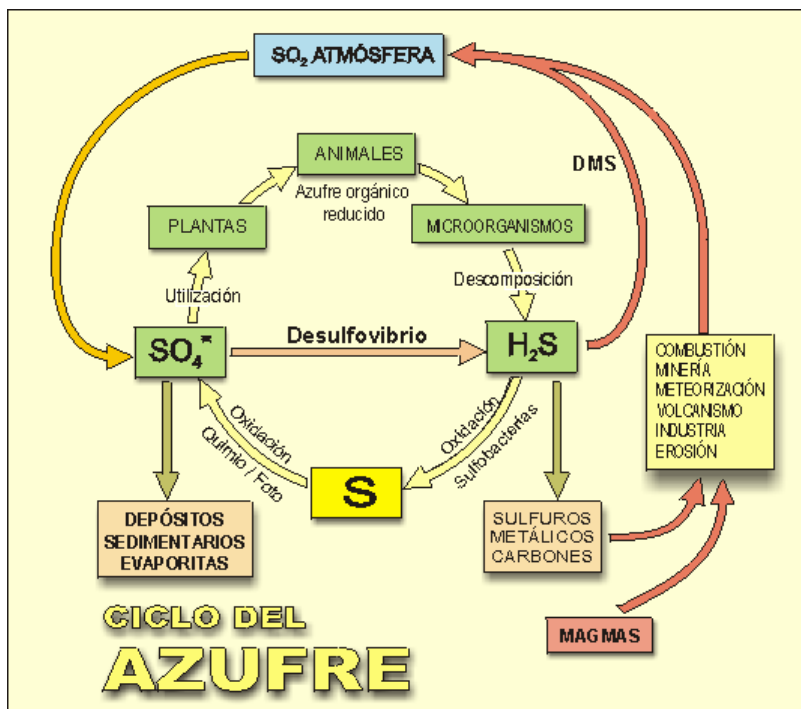


Figura 2.20: Ciclo del azufre en el ambiente. [10]

#### 2.2.4.4 Cloruros.

El origen de los cloruros atmosféricos corresponde al agua de mar, que puede arrastrar el ion cloruro disuelto o como sal sódica, tras la evaporación. Ambas formas alcanzan en la atmósfera concentraciones comprendidas entre 0,5 y 5 g/m<sup>3</sup>.

Otra fuente natural de emisión de cloruros a la atmósfera son los gases procedentes de volcanes en erupción. Asimismo, las actividades de naturaleza antropogénica son responsables de la emisión a la atmósfera de cantidades importantes de estos compuestos.

El depósito de partículas salinas sobre la superficie metálica acelera su corrosión, sobre todo si, como en el caso de los cloruros, pueden dar lugar a productos de corrosión solubles en lugar de los escasamente insolubles que se forman en agua pura. Por otro lado, los cloruros disueltos en la capa de humedad elevan considerablemente la conductividad de la película del electrolito sobre el metal y tienden a destruir eventuales películas pasivantes.

Está perfectamente establecido el importante efecto de este contaminante en la corrosión metálica, sin embargo, la información cuantitativa en el caso de los cloruros es menos abundante que en el caso del  $\text{SO}_2$ .

Para que el ion cloruro acelere la corrosión es necesario que la superficie metálica esté humedecida. El valor de la HR a partir de la cual la sal comienza a absorber agua de la atmósfera (higroscopicidad) parece ser crítico desde el punto de vista de la corrosión. Ambler y Bain comprobaron que la humedad del 78%, que es la de equilibrio con la solución saturada de NaCl, coincidía con la fuerte aceleración de la corrosión del acero al carbono.

Entre las variables con influencia en la salinidad atmosférica destacan: régimen de vientos dominantes (dirección y velocidad), distancia a la costa, topografía de la zona, altitud, etc. La figura 2.21 representa la corrosión por cloruros en un metal.

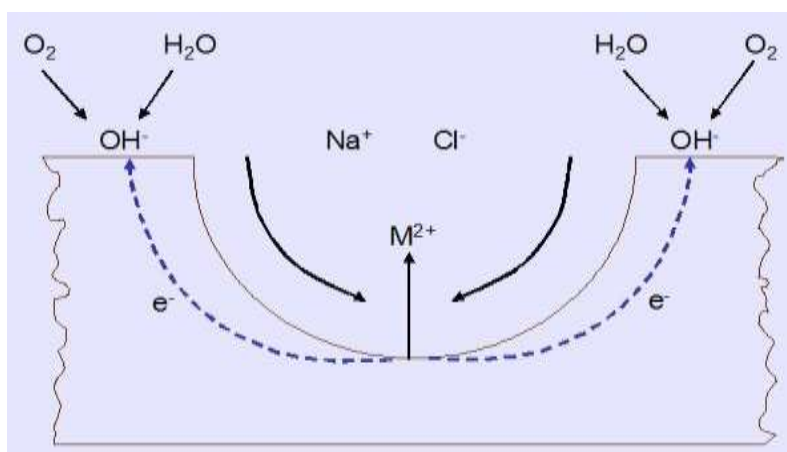


Figura 2.21: Corrosión por cloruros. [11]

## 2.2.5 Estándar para la construcción de la estación de monitoreo (ASTM G50-10 2015)

### 2.2.5.1 Propósito de la Norma ASTM G50-10 2015

Esta práctica cubre y define las condiciones para la exposición de metales y aleaciones a la intemperie. Establece los procedimientos generales que deben seguirse en cualquier prueba atmosférica. Se presenta como una ayuda en la

realización de pruebas de corrosión atmosférica para evitar algunas de las trampas de dichas pruebas. Como tal, se ocupa principalmente de las exposiciones de panel para obtener datos con fines de comparación.

### **2.2.5.2 Bastidores y marcos de exposición**

Los bastidores para realizar las pruebas de avance de la corrosión ambiental deben ser contruidos con un material resistente que pueda permanecer lo más intacto posible durante el tiempo de exposición propuesto. Se ha encontrado que el material galvanizado es adecuado para la construcción de racks en la mayoría de los entornos.

Si la tubería galvanizada está roscada en el campo, las áreas roscadas deben protegerse para garantizar la integridad de la junta durante períodos de exposición prolongados. En ambientes severos, es posible que se requieran recubrimientos adicionales para brindar un servicio libre de corrosión.

Las estructuras de exposición deben diseñarse con el fin de proveer una mayor área de exposición al ambiente tanto en la cara superior de las muestras como en la inferior. Los miembros estructurales del bastidor no deben ubicarse directamente debajo de las muestras donde albergarían la parte inferior de las muestras.

El ángulo y orientación recomendado para las estructuras de exposición recomendado se basa en la mayoría de datos publicados sobre corrosión atmosférica, esto es, con un ángulo de 30 grados y con sus rejillas estando al menos a 760 mm del suelo. En cuanto a la orientación, visto que nuestro país se ubica en el hemisferio norte y con el fin de obtener la mayor exposición posible al sol lo ideal es que las muestras estén viendo hacia el sur.

El suelo debajo de las rejillas debe mantenerse libre de malezas, arbustos y escombros. Los herbicidas, defoliantes o pesticidas orgánicos no deben usarse para este propósito. La figura 2.22 representa una estación de monitoreo para la corrosión ambiental, construida de acuerdo a la norma ASTM G50-10 2015.

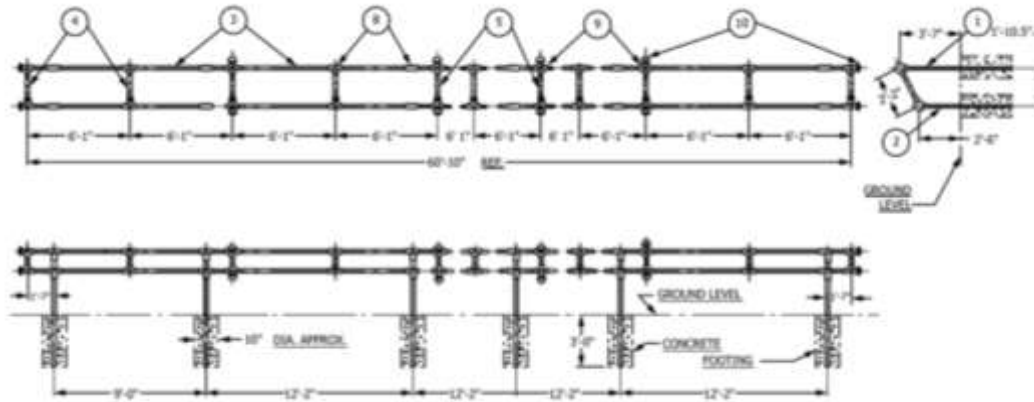


Figura 2.22: Estructura para monitoreo de la corrosión ambiental construida bajo las indicaciones de la norma ASTM G50-10 2015. (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales, 2015)

## 2.3 Caracterización del ambiente de San Salvador

### 2.3.1 Generalidades.

Desde el punto de vista meteorológico el municipio de San Salvador, así como el resto del país presenta dos estaciones a lo largo del año: una estación seca y una estación lluviosa. La estación seca presenta un ambiente muy caliente, húmedo y mayormente despejado; en cambio la estación lluviosa es caliente, opresiva y nublada. [22]

En general la temperatura a lo largo del año oscila entre los 17 y 31 grados centígrados superando en contadas ocasiones los 33° o cayendo debajo de los 15°. [22]

### 2.3.2 Temperatura

En términos de la temperatura podemos encontrar dos grandes grupos, la temporada fresca que comprende los meses de septiembre a diciembre donde la temperatura máxima ronda los 28°, sin embargo, el mes más frío en este municipio no está dentro de este intervalo puesto que este mes se trata de enero donde podemos encontrar temperaturas mínimas del orden de los 17°. [22]



Por otro lado, en la temporada calurosa que comprende de los meses de febrero a abril podemos encontrarnos con temperaturas máximas que suelen situarse sobre los 30° y que bajan hasta los 20°, el mes más caluroso del año si se sitúa en este intervalo y se trata del mes de abril donde las máximas promedian 31°. [22] En la figura 2.23 se tiene una representación gráfica de las temperaturas máximas y mínimas del municipio de San Salvador a lo largo del año.

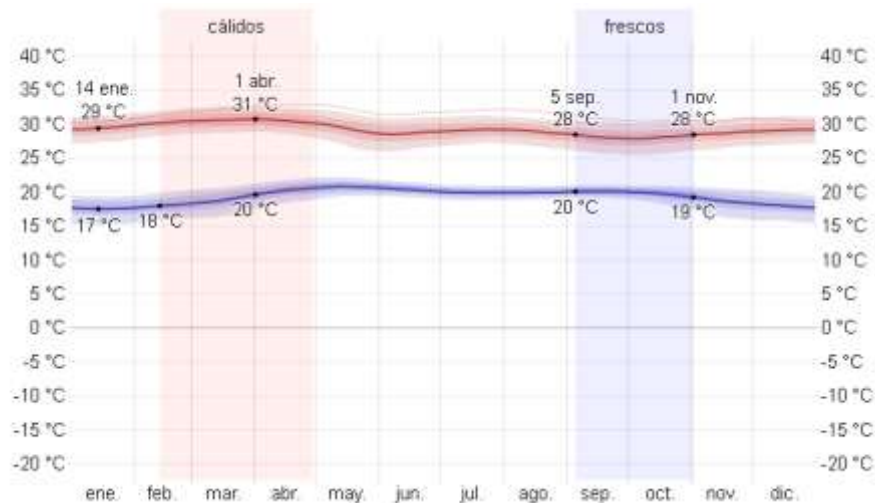


Figura 2.23: Temperatura de San Salvador. [22]

### 2.3.3. Nubosidad

La nubosidad en el municipio de San Salvador puede variar mucho dependiendo de la época del año de la que estemos hablando, el cielo de San Salvador es mayormente despejado durante aproximadamente 5 meses en el año estos meses usualmente son los de noviembre a abril, siendo enero el mes más despejado del año donde se promedia un 78% del mes en el que el cielo no presenta nubosidad de ningún tipo. [22]

Como es de esperar de un país tropical la mayor parte del año presenta nubosidad, en este caso los 7 meses restantes del año son bastante nubosos destacando entre ellos junio donde hasta el 91% del mes tiene presencia de nubosidad coincidiendo con el inicio de la temporada de huracanes en ambos océanos y con los respectivos giros monzónicos que se encargan de cargar el territorio de humedad y provocar abundantes precipitaciones. [22] En la figura 2.24

se tiene el porcentaje de tiempo pasado en cada banda de cobertura de nubes, categorizado según el porcentaje del cielo cubierto de nubes.

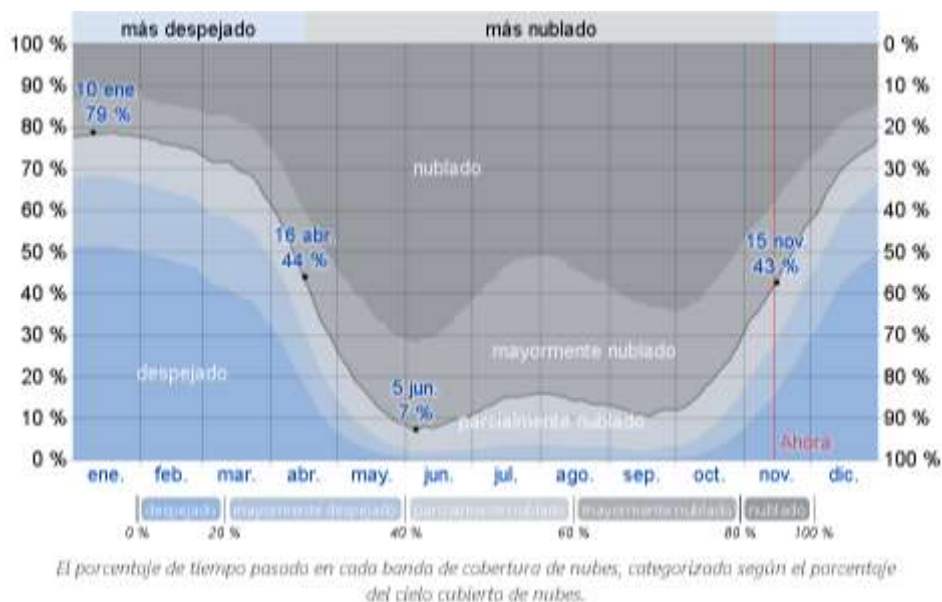


Figura 2.24: Nubosidad en San Salvador a lo largo del año. [22]

### 2.3.4. Lluvia

Las lluvias en el municipio de San Salvador varían muchísimo a lo largo del año, durante la estación lluviosa que los meteorólogos han establecido entre los meses de abril y noviembre podemos encontrar picos en los meses de junio y septiembre con hasta 137 mm y 146 mm de lluvia en un solo día. [22]

Durante la estación seca nos encontramos con el extremo opuesto con valores tan bajos como 2mm por día en el mes de febrero, estos valores concuerdan con lo analizado anteriormente en la cantidad de nubes presentes en el cielo capitalino. [22] En la figura 2.25 se tiene una representación gráfica de la cantidad de lluvia del municipio de San Salvador a lo largo del año.



Figura 2.25: Lluvia en San Salvador a lo largo del año. [22]

### 2.3.5. Luz Solar

Un factor muy importante pero que a veces pasa desapercibido en este tipo de estudios es la incidencia de la luz solar en el área de estudio, como en casi todos los países cercanos al ecuador del planeta la luz solar y su incidencia sobre la superficie no cambia de manera significativa, siendo las variaciones entre las diferentes épocas del año de apenas unos cuantos minutos. [22]

En el caso específico de San Salvador el día más corto es el *21 de diciembre*, con *11 horas y 19 minutos* de luz natural; el día más largo es el *20 de junio*, con *12 horas y 56 minutos* de luz natural. [22]

La salida del sol más temprana es a las 05:28 el 1 de junio, y la salida del sol más tardía es 56 minutos más tarde a las 06:24 el 23 de enero. La puesta del sol más temprana es a las 17:25 el 19 de noviembre, y la puesta del sol más tardía es 1 hora y 3 minutos más tarde a las 18:28 el 9 de julio. [22]

En la figura 2.26 indica el horario anual de la salida y puesta del sol del municipio de San Salvador a lo largo del año.

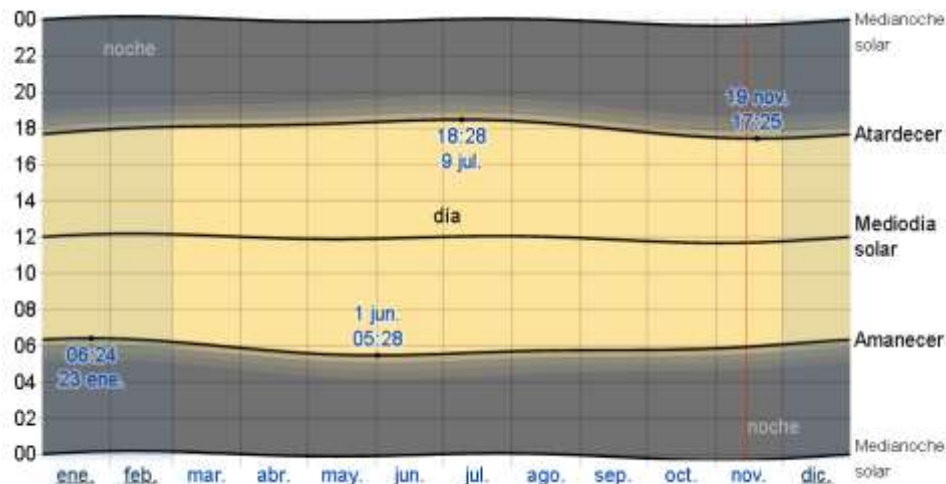


Figura 2.26: Horario anual de luz solar en San Salvador. [22]

### 2.3.6. Humedad

La mayoría de estudios fijan el nivel de comodidad basados en el punto de rocío ya que es esto lo que determina si el sudor se evaporara de la piel bajando la temperatura del cuerpo y en el caso de las estructuras metálicas lo que determinara si el rocío encima de las piezas o las gotas remanentes sobre la superficie metálica se evaporaran y la rapidez con la que esto pasará. [22]

Cuando los puntos de rocío son más bajos se siente más seco y cuando son altos se siente más húmedo. A diferencia de la temperatura, que generalmente varía considerablemente entre la noche y el día, el punto de rocío tiende a cambiar más lentamente, así es que, aunque la temperatura baje en la noche, en un día húmedo generalmente la noche es húmeda. [22]

En el municipio de San Salvador los niveles de humedad varían de forma extrema, los meses más húmedos van desde marzo a diciembre donde el nivel de comodidad es opresivo o peor en al menos el 47% del tiempo destacando entre todos estos meses el de agosto donde prácticamente la totalidad del mes se tiene valores de humedad de al menos del 95% y con 30 de 31 días clasificados como bochornosos o peor, su contraparte sería enero que presenta humedades del rango del 30% y con apenas 9 días clasificados como bochornosos o peor. [22] La

figura 2.27 indica el porcentaje en varios niveles de comodidad de humedad, categorizado por el punto de rocío.

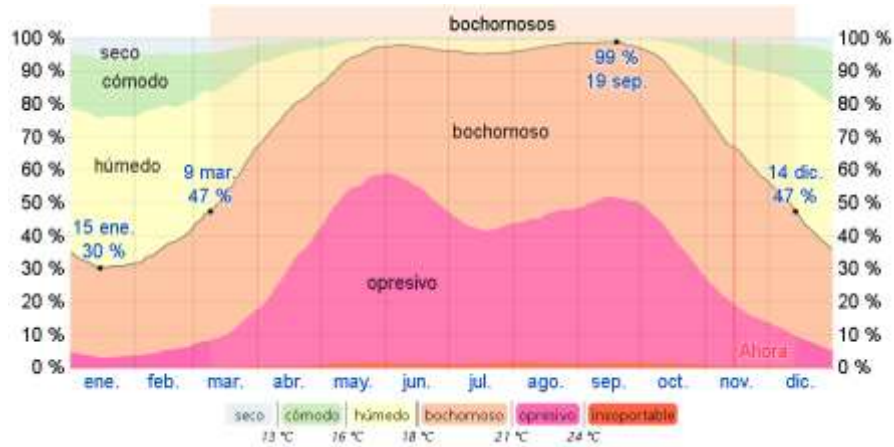


Figura 2.27: Humedad en San Salvador. [22]

### 2.3.7 Viento

Por último, tenemos el vector viento, importante debido a las partículas que este transporta que podrían afectar en el proceso de corrosión sobre las muestras metálicas, para este apartado tenemos que establecer que los calores podrían ser diferentes según la topografía del lugar y los datos mostrados corresponden a mediciones realizadas 10 m sobre el suelo, sin embargo, proporcionan una muy buena aproximación de los valores en la superficie. [22]

El primer apartado que nos interesa es la velocidad del viento medido en km/h, el mes más ventoso corresponde a enero con un promedio de 14.5 km/h mientras el mes más calmado resulta ser de nuevo agosto con vientos promedio de 8.2 km/h, el resto del año promedia valores de hasta 11 km/h, sin embargo, no hay que descartar el efecto de ciclones tropicales o ráfagas de viento que provocan un cambio bastante drástico con relación a la velocidad del viento. [22] En la figura 2.28 se representa el promedio de velocidad media del viento por hora (Línea gris oscuro), con las bandas de percentil 25° a 75° y 10° a 30° del municipio de San Salvador a lo largo del año.

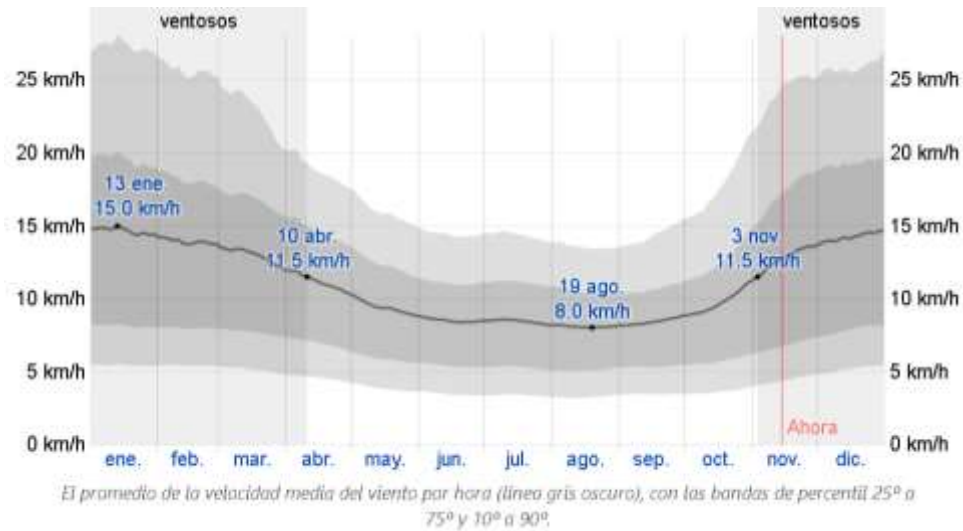


Figura 2.28: Viento en San Salvador. [22]

Visto que la estructura para medir el avance de la corrosión ambiental tiene una inclinación determinada y estará apuntando hacia un punto cardinal en específico es importante conocer la dirección de los vientos en las diferentes épocas del año, los estudios climáticos del área de San Salvador nos muestran que el viento con más frecuencia viene del sur durante 2.7 meses, del 5 de abril al 27 de junio y durante 2.1 meses, del 8 de agosto al 10 de octubre, con un porcentaje máximo del 39 % en 4 de junio. El viento con más frecuencia viene del este durante 1.4 meses, del 27 de junio al 8 de agosto, con un porcentaje máximo del 38 % en 15 de julio. El viento con más frecuencia viene del norte durante 5.8 meses, del 10 de octubre al 5 de abril, con un porcentaje máximo del 65 % en 1 de enero. La figura 2.29 indica el porcentaje de horas en las que la dirección media del viento viene de cada uno de los cuatro puntos cardinales, excluidas las horas en las que la velocidad media del viento es menor a 1.6 km/h. Las áreas de colores claros en los límites son el porcentaje de horas que pasa en las direcciones intermedias implícitas (Noreste, sureste, suroeste y noroeste).

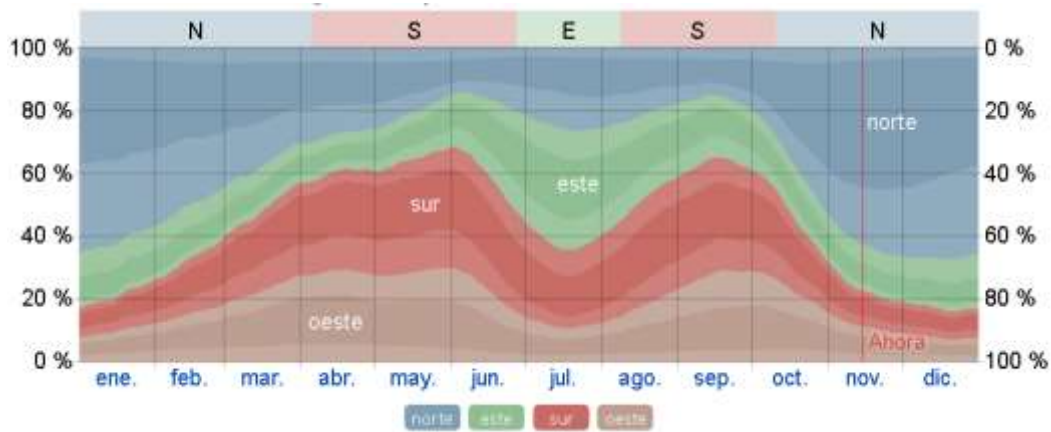


Figura 2.29: Dirección del viento. [22]

### 2.3.8 Clasificación del ambiente según la norma ISO 12944

La norma ISO 12944 es uno de los principales estándares internacionales para clasificar el ambiente corrosivo presente en un lugar determinado, proporciona una guía para los ingenieros y expertos en corrosión en la adopción de las mejores prácticas de protección del acero y superficies metálicas mediante recubrimientos.

Podemos ver en la tabla aquí abajo los diferentes ambientes en lo que se puede clasificar un lugar en específico siguiendo este estándar.

Tabla 2.2: Categorías de Medio ambientes corrosivos según ISO 12944. (Organización Internacional de Normalización, Protección de estructuras de acero frente a la corrosión mediante sistemas de pintura protectores, ISO 12944).

Categorías de Medios ambientes corrosivos según ISO 12944

Categoría	Corrosión	Perdida de Masa por unidad de superficie/perdida de espesor (tras el primer año de exposición)		Ejemplos de medio ambiente	
		Acero de bajo contenido en carbono		Exterior	Interior
		Perdida de masa, g/m <sup>2</sup>	Perdida de espesor, μm		
C1	Muy baja	≤10	≤1.3		Interior de edificios calefaccionados con atmósfera neutra, oficinas, escuelas, comercios
C2	Baja	>10 y hasta 200	>1.3 y hasta 25	Atmósferas con bajos niveles de polución, principalmente rurales.	Edificios no calefaccionados donde puede haber condensación (depósitos, gimnasios)
C3	Media	>200 y hasta 400	>25 y hasta 50	Atmósferas urbanas e industriales, moderadamente poluidas con dióxido de azufre y áreas costeras con baja salinidad	Áreas productivas con alta humedad y alguna polución del aire ( lavaderos, comedores)
C4	Alta	>400 y hasta 650	>50 y hasta 80	Áreas industriales y costeras con moderada salinidad	Plantas químicas, natatorios, muelles costeros
C5-I	Muy alta(industrial)	>650 y hasta 1500	>80 y hasta 200	Áreas industriales con alta humedad y atmósfera agresiva	Edificios o áreas con condensación casi permanente y con alta polución
C5-M	Muy alta (marina)	>650 y hasta 1500	>80 y hasta 200	Áreas costeras y marinas con alta salinidad	Edificios o áreas con condensación casi permanente y con alta polución

Tomando en cuenta esta tabla y la descripción de los factores anteriores podemos clasificar a San Salvador dentro de la categoría C3, es decir, un ambiente de corrosión media con una atmosfera urbana de relativamente alta humedad y con un ambiente contaminado a causa de los gases liberados por el tráfico y la cantidad de habitantes que la ciudad posee, ya que se trata de la capital del país y por consiguiente la ciudad que libera más contaminantes en la atmósfera.



## **CAPITULO 3: METODOLOGÍA Y ANÁLISIS**

En este capítulo se expondrá la metodología a seguir para la medición del avance de la corrosión. Detallando los materiales y procedimientos para la recolección de datos para su posterior análisis.

### **3.1. Procedimiento para medir el avance de la corrosión en la estación.**

El procedimiento para obtener datos de los ensayos de corrosión en la estación de monitoreo es el establecido en la norma ASTM G-50 (Ensayos de corrosión atmosférica de metales) incluyendo las recomendaciones que ahí aparecen. El procedimiento también incluye datos detallados tipo de material para la caracterización del ensayo como tiempo de exposición, práctica de limpieza y reporte de los datos.

#### **3.1.1. Material para las muestras de ensayo.**

Para hacer la caracterización de la corrosividad atmosférica se recomienda usar uno de los siguientes materiales: Cobre, Acero al carbono estructural (A36, con un mínimo de 0.2% de Cu) y Zn de alta pureza (B6 de alto grado). Se deben preparar las suficientes muestras para hacer la adecuada caracterización de la corrosión en el lugar del ensayo, para este caso en particular se harán ensayos con 45 probetas.

#### **3.1.2. Preparación de las muestras de ensayo.**

Las muestras para el ensayo de corrosión ambiental en la estación de monitoreo de la UES deberán tener un tamaño de 15 x 7.5 cm.

Se deberán tener en cuenta las siguientes consideraciones para el correcto desarrollo del ensayo:

- a) Asignar a las muestras un código para ser fácilmente identificadas y una posición fija en los racks de exposición. (Por ejemplo, una letra para las filas y un numero para la posición contando de izquierda a derecha)
- b) Limpiar todas las muestras usando el mismo procedimiento con el fin de asegurar que todas las muestras están en las mismas condiciones iniciales para no tener discrepancias en el ensayo.

El procedimiento para limpiar las muestras antes de la exposición debe ser el siguiente (o lo más parecido)

1. Desengrasar y remojar para remover las impurezas o costras presentes en la superficie del material.
2. Lavar con jabón restregando hasta que el agua salga clara.
3. Limpiar con papel toalla.
4. Limpiar con un desengrasante como alcohol o acetona.
5. Llevar al desecador antes de pesar las muestras.
6. Pesar las muestras y guardar los datos obtenidos para cada muestra.

### 3.1.3. Recolección de datos.

Los datos obtenidos en las diferentes partes del procedimiento deberán ser recogidos en forma de tablas para poder aumentar la versatilidad de los mismos y su posterior uso.

La tabla 3.1 muestra un formato de ejemplo para recolectar datos de las muestras expuestas.

*Tabla 3.1: Tabla para recolección de datos. (Duarte Díaz, G, 2002)*

Sitio de exposición:						
Latitud:			Longitud:			
Código	Exposición (días)	Masa original (g)	Masa final (g)	Masa perdida (g)	Masa perdida (mg/m <sup>2</sup> )	Corrosión (mm/año)

En el caso de los datos de específicos del material a utilizar se recomienda utilizar el formato presentado en la tabla 3.2:

Tabla 3.2: Tabla para recolección de datos para un material específico. (Duarte Díaz, G, 2002)

Material:	Acero A36	
Composición		Densidad: 7.85 g/cm <sup>3</sup>
Elemento	%	Dimensiones: 15x7.5x1 mm
		Área de exposición:

Se recomienda guardar las probetas en bolsas secas y herméticamente selladas hasta el día de su colocación en la estación de monitoreo para evitar errores durante el procedimiento de medición de avance de la corrosión.

#### 3.1.4. Exposición de las muestras.

El periodo de exposición de las muestras el ambiente dependerá de la necesidad de tener estos datos, se recomienda un periodo de un año, pero pueden considerarse periodos de 3, 6, 9, 12, 24 o 48 meses. En el caso del ambiente de la UES no se espera que el avance de la corrosión sea tan severo por lo que no se recomienda acortar el periodo de exposición, sin embargo, si la corrosión ocurre a un ritmo más lento del estimado se aconseja alargar el periodo de prueba.

El panel con las probetas se expone a 30° de la horizontal, con cara al sur en el hemisferio Norte o hacia la fuente de contaminación. Las probetas deben estar a un mismo nivel sobre el panel y debidamente aisladas.

#### 3.1.5. Recolección de las muestras.

La recolección de las muestras al finalizar el periodo de exposición deberá hacerse de la siguiente manera:

1. Removerse y ser puestas en bolsas herméticamente selladas y con la debida identificación de la muestra contenida. En el caso de que el código de

identificación ya no se distingue se debe contar con un mapa para ubicarla según su posición.

2. Si la muestra está húmeda deberá secarse, se pueden realizar fotografías de las muestras previamente para ver el estado en el que fueron retiradas antes del secado.
3. Limpiar las muestras conforme al procedimiento de la norma ASTM G1, detallada en la siguiente sección.

### 3.1.6. Limpieza de las muestras recolectadas conforme a la norma ASTM G-1.

Un procedimiento ideal conforme a la norma ASTM G-1 (Preparing, cleaning and evaluating corrosion test specimens) removerá solo productos de corrosión y no metal base. Para determinar la masa perdida del metal cuando se remueven los productos de corrosión las réplicas se deben limpiar con el mismo método.

Las muestras deberán ser pesadas antes y después de cada lavado, la diferencia de peso será el peso de los productos de corrosión remanentes en cada muestra. Este proceso se puede repetir cuantas veces se considere necesario.

La masa perdida se grafica como función del número de limpiezas hechas. De esta gráfica se obtendrán dos líneas AB y BC y la masa perdida por corrosión corresponderá al punto B; tal como se indica en la figura 3.1. Para minimizar la incertidumbre asociada al método de limpieza de la corrosión. El método por escoger debe procurar la mínima inclinación (cerca de la horizontal).

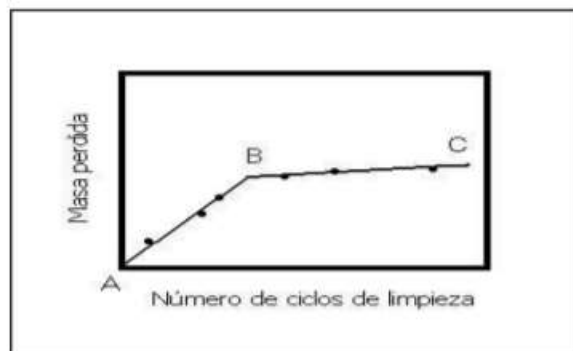


Figura 3.1: Gráfica generada haciendo uso del método de pérdida de masa. (ASTM G1)

Al finalizar las pruebas de lavado las muestras deberán ser enjuagadas y secadas inmediatamente. Todas las disoluciones preparadas para la limpieza deben hacerse con agua destilada y reactivos de grado químico.

A continuación, en la tabla 3.3 se presentan algunas disoluciones que pueden ser utilizadas en el proceso de limpieza de las muestras.

Tabla 3.3: Disoluciones para la limpieza de las muestras. (Duarte Díaz, G, 2002)

Designación	Solución	Tiempo	Temperatura	Observaciones
C.3.1	1000 mL ácido clorhídrico (HCl, sp gr 1.19) 20 g trióxido de antimonio (Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) 50 g Cloruro de estaño (SnCl <sub>2</sub> )	1 a 25 min	20 a 25 °C	La solución debe ser bien agitada o la probeta cepillada. Algunas veces puede requerir de largo tiempo.
C.3.2	50 g Hidróxido de sodio (NaOH) 200 g de zinc granulado pedacitos de zinc. Agua destilada hasta llenar 1000mL	30 a 40 min	80 a 90°C	Tome las precauciones adecuadas si utiliza polvo de zinc.
C.3.3	200 g Hidróxido de sodio (NaOH) 20 g de zinc granulado pedacitos de zinc. Agua destilada hasta llenar 1000mL	30 a 40 min	80 a 90°C	Tome las precauciones adecuadas si utiliza polvo de zinc.
C.3.4	200 g de citrato de diamonio ((NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> HC <sub>6</sub> H <sub>5</sub> O <sub>7</sub> ) Agua destilada hasta llenar 1000mL	de 20 min	75 a 90°C	Dependiendo de la composición de los productos de corrosión, puede ocurrir ataque del metal base.
C.3.5	500 mL ácido clorhídrico (HCl, sp gr 1.19) 3.5 g tetramino hexametileno Agua destilada hasta llenar 1000mL	10 min	20 a 25 °C	Puede requerir de tiempos mas largos
C.3.6	Soda cáustica derretida (NaOH) con 1.5 – 2.0 % hidruro de sodio (NaH)	1 a 20 min	370°C	

### 3.1.7. Cálculo de la corrosividad del ambiente.

Para esto se usará el método de calcular la pérdida de peso de los materiales (mg/m<sup>2</sup>) y la proporción de corrosión (mm/año) utilizando las ecuaciones que se pueden encontrar en la norma ASTM G-92 (Characterization of Test Sites)

#### a) Masa perdida por unidad de área:

$$Ma = \frac{M}{A}$$

Ec. 3.1

Donde:

Ma= Masa perdida por unidad de área (mg/m<sup>2</sup>)

M= Masa perdida (mg)

A= Área superficial expuesta, incluyendo los dos lados y todos los bordes (m<sup>2</sup>)

**b) Proporción de corrosión (mm/año)**

$$C = \frac{(8.76 \times 10^4) Mp}{atd}$$

$$Ma = \frac{M}{A}$$

Ec. 3.2

Donde:

C= Proporción de corrosión (mm/año)

Mp= Masa perdida (g)

a= Área superficial expuesta, incluyendo los dos lados y todos los bordes (cm<sup>2</sup>)

t= Tiempo de exposición (h)

d= Densidad del material (g/cm<sup>3</sup>)

**3.2. Cotización**

**3.2.1. Materiales**

La estructura se realizará con Acero galvanizado en frio, con materiales que ya se encuentran a la venta en cualquier ferretería del país, en la tabla 3.4 se presenta una cotización de los diferentes materiales necesarios para la estructura de la estación de monitoreo.

Tabla 3.4: Cotización de precios en diferentes ferreterías del país.

Imagen de referencia	Material	Características	Precio	Cantidad	Total	Proveedor
	AG – ANGULO ¼*2 ½ PULG (6.35mm)	Longitud: 6m Espesor: ¼ pulg Ancho de ala 2 ½ pulg	\$54.25 por pieza	1	\$54.25	Vidrí
	Angulo ¼ pulg (6.00mm)	Longitud: 6m Espesor: ¼ pulg Ancho de ala 2 ½ pulg	\$54.25 por pieza	1	\$54.25	Freund
	Platina ¼ x1 ½ pulg	Longitud: 6m Ancho 1 ½ pulg Espesor: ¼ pulg	\$17.90 por pieza	1	\$17.90	Vidrí
	Platina ¼ * 2 ½ pulg	Longitud: 6m Ancho 2 ½ pulg Espesor: ¼ pulg	\$29.00 por pieza	1	\$29.00	Freund
	Perno estufa cabeza redonda cincado	Ancho: 5mm Largo del perno: 35mm	\$0.20 por pieza	10	\$2.00	Vidrí
	Perno cabeza hexagonal galvanizado	Diámetro: 5/16 pulg Largo: 1 pulg	\$0.28	10	\$2.80	Freund

Continúa...

Tabla 3.4: Cotización de precios en diferentes ferreterías del país (Continuación...)

Imagen de referencia	Material	Características	Precio	Cantidad	Total	Proveedor
	Perno cabeza hexagonal galvanizado	Diámetro: 5/16 pulg Largo: 1 pulg	\$0.28	10	\$2.80	Freund
	Tuerca hexagonal rosca fina cincada	Diámetro: ½ pulg	\$0.20 por pieza	10	\$2.00	Vidrí
	Tuerca hexagonal galvanizada	Diámetro: 5/16 pulg	\$0.07 por pieza	10	\$0.70	Freund
	Arandela plana cincada	Diámetro: 8mm	\$0.05 por pieza	10	\$0.50	Vidrí
	Arandela plana galvanizada	Diámetro: ½ pulg	\$0.19 por pieza	10	\$1.90	Freund
	Anticorrosivo Cromato de Zinc	Presentación: 1 galón	\$49.25 por galón	1	\$49.25	Freund



### 3.2.2. Mano de obra

Al cotizar la mano de obra para la realización de la estructura para la estación de monitoreo, se consultó en 3 lugares. Sin embargo, en los primeros dos lugares no se obtuvo respuesta, quedando como única opción la restante; dando como precio estimado de \$60.

### 3.3. Planos de la estructura

Los planos utilizados para la construcción de la estructura se presentan en esta sección divididos por vistas en el siguiente orden: frontal, racks, piezas que regulan la inclinación de la base, lateral, posterior y base.

#### 3.3.1. Vista frontal:

En la figura 3.2 se presenta el plano de la vista frontal de la estructura.

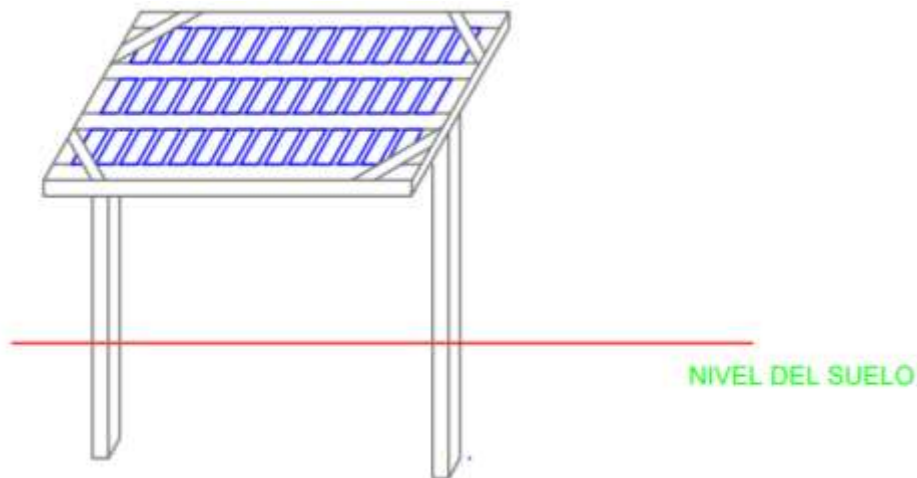


Figura 3.2: Plano de vista frontal de la estructura

#### 3.3.2. Racks de exposición:

Vista del rack donde se colocarán las muestras a corroer. En la figura 3.3 se presenta el plano del rack de exposición, que es la base donde se colocaran las muestras a analizar.

### RACKS DE EXPOSICION

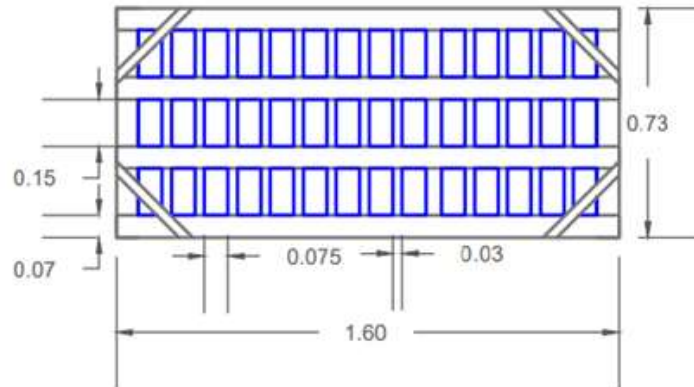


Figura 3.3: Plano del rack de exposición.

### 3.3.3. Piezas que regulan la inclinación de la base

En la figura 3.4 se presenta el plano de las piezas que regularan la inclinación del rack de exposición.

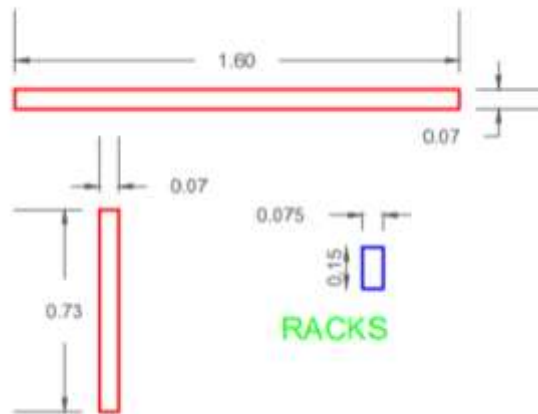


Figura 3.4: Plano de vista de las piezas que regulan la inclinación de la base

### 3.3.4. Vista posterior de la estructura

En la figura 3.5 se presenta el plano de la vista posterior de la estructura.

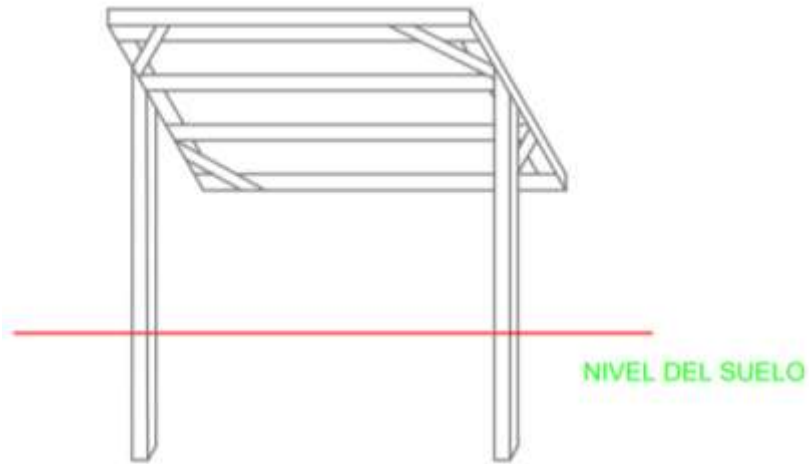


Figura 3.5: Plano de vista posterior de la estructura

### 3.3.5. Vista lateral:

En la figura 3.6 se presenta el plano de la vista lateral de la estructura.

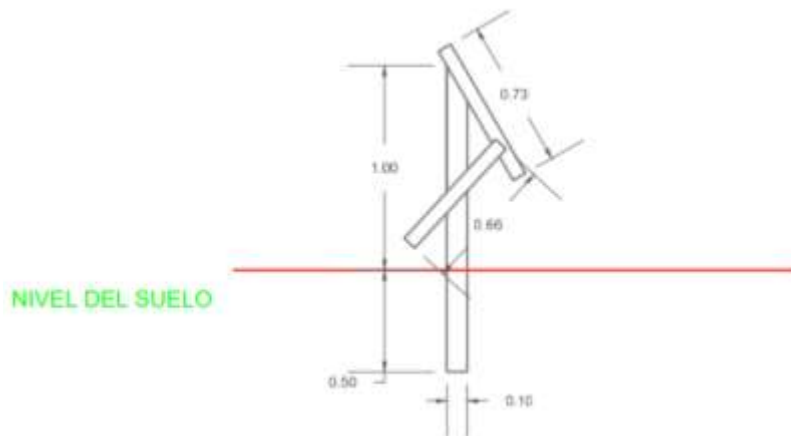
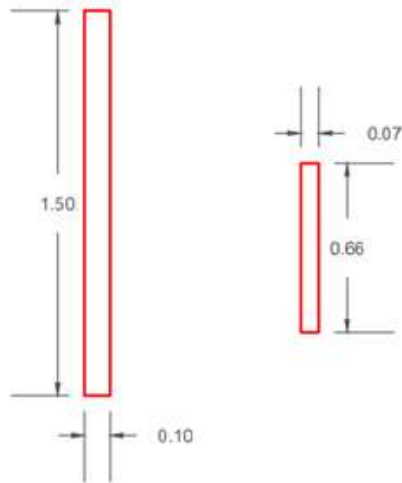


Figura 3.6: Plano de vista lateral de la estructura

### 3.3.6. Vista de la base que sostendrá la estructura

En la figura 3.7 se presenta el plano de las patas que sostendrán la estructura.



*Figura 3.7: Plano de vista de las patas de la estructura*

### 3.4. Implementación

Luego de hacer la investigación teórica del tema y de la cotización de materiales, se llegó a la implementación del rack. En la figura 3.8 se tiene la vista frontal del rack de exposición.



*Figura 3.8: Vista frontal del rack*

En la figura 3.9 se tiene la vista lateral del rack.



*Figura 3.9: Vista lateral del rack*

En la figura 3.10 se tiene la vista frontal del rack de exposición.



*Figura 3.10: Vista frontal del rack*

## CONCLUSIONES

La presente investigación bibliográfica correspondiente al diseño e implementación de una estación para el monitoreo de la corrosión ambiental, así como el desarrollo de una metodología para la recolección de datos útiles para el estudio del avance de este tipo de corrosión en el ambiente de la UES, y con la culminación de la misma se puede concluir que:

Se logró identificar los factores específicos que afectan la velocidad de corrosión ambiental en el lugar de instalación de la estación de monitoreo y así elaborar un presupuesto para la mejor selección de materiales para la implementación de una estación de monitoreo.

Se puede desarrollar los procedimientos o normativas para medir el avance de la corrosión ambiental en estaciones de este tipo.

Se logró establecer los criterios para el monitoreo de la corrosión ambiental.

De la misma manera, con la información recolectada durante la investigación y su posterior análisis podemos concluir que:

- a) Los factores más importantes en el avance de la corrosión ambiental en la zona de la UES son: la temperatura, la humedad relativa, las precipitaciones, nivel de contaminación, incidencia de luz solar, velocidad y dirección del viento.
- b) El presupuesto obtenido para la implementación de la estructura está al alcance de la comunidad estudiantil por lo cual puede utilizarse este trabajo como referencia al momento de diseñar o implementar otra estructura similar sea dentro de la institución educativa o una externa a esta.
- c) El avance esperado de la corrosión en la zona de San Salvador viene determinado por la caracterización del ambiente según la norma ISO 12944, en la cual este ambiente es clasificado como del tipo C3, un ambiente "Urbano de alta humedad". Esto significa que, si bien no se tiene la influencia directa de un ambiente altamente corrosivo como el marino se tiene un alto porcentaje de humedad la mayoría del año y también una cantidad

considerable de contaminantes urbanos principalmente en los gases que suben a la atmosfera como el CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, etc.

- d) El procedimiento para la obtención de datos experimentales y su posterior usando la estación está diseñado conforme a la norma ASTM G-50 (Ensayos de corrosión atmosférica de metales). De esta manera se puede contar con resultados fiables en investigaciones futuras sobre el tema.

Es importante mencionar que en caso de que el proyecto sea tomado de base para otro de índole similar en otra parte del país, la caracterización del ambiente realizada en el desarrollo del proyecto aplica solo al área del municipio de San Salvador por lo cual esta parte de la investigación deberá realizarse conforme al lugar de ejecución.

## RECOMENDACIONES

A fin de dar seguimiento al estudio presentado, se sugiere seguir las siguientes recomendaciones:

1. Llevar a cabo un estudio de la corrosión ambiental, utilizando diferentes materiales expuestos al ambiente durante al menos 1000h, como lo indica la norma ASTM G-50 para apreciar el grado de influencia que tiene la atmosfera presente en las instalaciones de la Universidad de El Salvador, donde estará ubicada la estación de monitoreo de la corrosión ambiental.
2. Determinar el peso antes y después de la exposición al ambiente, para el cálculo de la velocidad de corrosión, con el fin de establecer el grado de agresividad de esta atmosfera.
3. Llevar a cabo un estudio para determinar el método de protección contra la corrosión que más se adecua a esta atmosfera, con el fin de proteger las estructuras metálicas que se encuentran en condiciones vulnerables ante este tipo de corrosión (pupitres, pasamanos, gradas, polines de techos, etc.)
4. De la misma manera el presupuesto mostrado en la presente investigación fue hecho tomando en cuenta los precios de los materiales en el mercado salvadoreño durante la segunda mitad del año 2021, en consecuencia, es posible que estos precios sufran variaciones conforme al tiempo motivo por el cual se recomienda hacer una nueva cotización para obtener una aproximación más adecuada de los precios y solo tomar las cifras aquí mostradas como una referencia y no como una cantidad fija.
5. La metodología diseñada en esta investigación está hecha siguiendo las disposiciones de la norma ASTM G-50, si bien el procedimiento puede ser modificado a conveniencia de la persona que desee usarla en ciertas partes se recomienda seguir todos los procedimientos como se describen y no modificarlos o hacerlo solo en una mínima parte con el fin de obtener resultados más fiables.



## **BIBLIOGRAFIA**

- 1) Ahmad, Z. (2006). Principles of corrosion engineering and corrosion control. Butterworth - Heinemann. Saudi Arabia.
- 2) Contaminación Atmosférica (2012). Universidad de Buenos Aires. Argentina. Tomado de: <<https://n9.cl/hexh>>
- 3) ECCA (2011). Los fundamentos de la corrosión. Tomado de: <<https://n9.cl/sbesl>>
- 4) Genescá, J. (1995). Instituto latinoamericano de la comunicación educativa. Tomado de: < <https://n9.cl/3knf7>>
- 5) González Moreno, J. A. (2016). Tipos de corrosión de materiales. Jalisco, México. Tomado de: <<https://n9.cl/1atch>>
- 6) Javaherdashti, R. (2008). Corrosión influenciada microbiológicamente: una visión de ingeniería.
- 7) Jones, D. A (2016). Principles and prevention of corrosion. 2<sup>nd</sup> edition. New Jersey: Prentice Hall, Inc.
- 8) Laboratorio de Corrosión y protección (2015). Corrosión por fatiga. Universidad Autónoma de Cádiz. Tomado de: <<https://n9.cl/c69pz>>
- 9) Lara, S. E. (2012). Efecto de la corrosión atmosférica sobre la corrosión de materiales ferrosos (aceros) de sider – Perú. Modelo matemático. Nuevo Chimbote, Perú. Tomado de: <<https://n9.cl/hxwu5>>
- 10) Lenntech (1998). Ciclo del azufre. Tomado de: <<https://n9.cl/2gsf4>>
- 11) M. G. Fontana y N. D. Greene (1978), “Corrosion Engineering”, 2a. ed., McGraw-Hill.

- 12) M. Morcillo y S. Feliu (1993), en Mapas de España de Corrosividad Atmosférica, M. Morcillo y S. Feliu (Eds.), Programa CYTED, Madrid, España, 1993, pp. 57-99.
- 13) Revie, R. (2008). Corrosión y Control de la corrosión: una introducción a la ciencia y la ingeniería de la corrosión. Wiley y Sons, Inc. EE. UU.
- 14) Revie, R (2011). Manual de corrosión de Uhlig. Wiley y Sons, Inc. EE.UU.
- 15) Rodríguez, R. C. (2002). Evaluación de la corrosión atmosférica del acero expuesto en diversas atmósferas. Nuevo León. México.
- 16) Sahdev, M. (2010). Cheresources. Tomado de: < <https://n9.cl/w15xw>>
- 17) Salazar Jiménez, J. A. (2015). Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales. Tomado de: <<https://n9.cl/q249e>>
- 18) Sewpercoat (2000). Principios de corrosión biogénica Tomado de: <<https://n9.cl/lbu0h>>
- 19) T, Charng. (1997). Atmospheric Corrosion of materials. ASM International. United States. Tomado de: < <https://www.asminternational.org>>
- 20) T. Charng, F. Lansing. (1982). Revisión de las causas de corrosión y control de la corrosión en una instalación técnica. Informes técnicos de la NASA. Informe de progreso de la TDA 42-69, 145-156.
- 21) Tipos de corrosión (2018) UNAM. Tomado de: <<https://n9.cl/1lmqn>>
- 22) WeatherSpark (2016). Tomado de: < <https://n9.cl/kzf2a>>
- 23) Zarodozne, N. (2017). Corrosión. Tomado de: <<https://n9.cl/l4q7d>>

## ANEXOS

### ANEXO 1: Cotizaciones

#### a) Cotización solicitada en Almacenes Vidri.



#### Almacenes Vidri S.A. de C.V.

COTIZACION No. 17525

Dirección: 21 AVENIDA SUR, ENTRE 12 Y 14 C, PTE., BARRIO  
SANTAANITA, SAN SALVADOR  
SUCURSAL VENEZUELA

N.R.F: 2-7 | Giro : Ferrería | Teléfono: 2278-3033

Vendedor: IRMA LORENA  
Vidri Express

Correo: alvisa052@vidri.com.sv

Fecha: 18/11/2021

Cliente: Consumidor Final

Dirección:

Teléfono: 71889070

Correo:

Con Atención A: Consumidor Final

Empresa:

NRF:

Giro:

Condicion de pago:

Código	Producto	U.M.	Cantidad	Precio	Total
97873	TUBO ESTRUCTURAL CUADRADO 1" C	PZA	1.00	13.50	13.50
7566	HIERRO ANGULO 3MMX1.1/4"	PZA	2.00	14.00	28.00
28969	PERNO ANCLA 3/8X3" DE CAMISA	PZA	8.00	0.80	6.40
45375	TUBO ESTRUCTURAL RECTANGULAR 2	PZA	2.00	28.64	57.28
49250	BISAGRA CILINDRICA PARA PORTON	PZA	3.00	0.95	2.85

Precios incluyen IVA

\*\*Precios sujetos a cambios sin previo aviso\*\*

SUB TOTAL \$108.03

**Total \$108.03**

Observaciones:

Vendedor

Autorizado

Aceptado

**b) Cotización solicitada en Freund**



**F.F. CENTRO**

NRC : 41-8 NIT: 0614-010858-001-7  
 Giro : Venta Art. Ferrería, Materiales Construcción, Pinturas Y Arts.  
 3a. calle oriente 129 s.s.  
 e-mail: centro@freundsa.com TEL : 22711100 FAX: 22226565






Página 1 de 2 18/11/2021 08:51  
**COTIZACIÓN**  
  
 22566156

Fecha : 18/Nov/ 2021  
 Cliente : 0-ILIANA CALDERÓN  
 Vendedor : 736766 - \*\*\*\*\*0

0

Facturar : TIENDA  
 Registro :  
 Pago : CONTADO  
 Reg. Cuenta : 0  
 Documento : FACTURA CONSUMIDOR  
 Impuesto : GRAVADO  
 No. Camet :  
 No. Dui :  
 No. Nit :

DATOS COMPLEMENTO	SIN DESPACHO
Dirección : ND	

Línea	Código	Unidad	Descripción	Cantidad	Precio Cotizado	Total
01	3581311	C/U	TUBO ESTRUCT RECT 2X1P CHAPA 14"(1.8)	2.00	\$23.75	\$ 47.50
						
02	1610312	C/U	ANGULO R 1/8X1-1/4PX6MT (2.60MM)	2.00	\$11.75	\$ 23.50
						
03	10531011	C/U	TUBO ESTRUCT CUAD 1P CHAPA16(1.5MM)	1.00	\$12.50	\$ 12.50
						
04	615053	C/U	BISAGRA PIN P/PUERTA A 3/8 X 2 PLG	6.00	\$0.65	\$ 3.90
						
05	21673109	C/U	ANCLA CAMISA HLC F 3/8 X 3 PLG	8.00	\$2.30	\$ 18.40
						

Autorizado \_\_\_\_\_ Aceptado Cliente \_\_\_\_\_  
 \*\*\*\* PRECIOS EN DOLARES INCLUYEN IVA \*\*\*\*  
 \*\*\*\* COTIZACIÓN VALIDA POR UN DIA \*\*\*\*  
 \*\*\*\* PRECIOS SUJETOS A CAMBIOS SIN PREVIO AVISO \*\*\*\*  
 \*\*\*\* EMITIR CHEQUE A NOMBRE DE: FREUND S.A. DE C.V. \*\*\*\*

Sub-Total :	\$105.80
(-) Promoción / MRO	\$0.00
Sub-Total :	\$105.80
CESC 5% :	\$0.00
IVA :	\$0.00
IVA Retención 1%:	\$0.00
IVA Percepción 1%:	\$0.00
<b>TOTAL :</b>	<b>\$105.80</b>