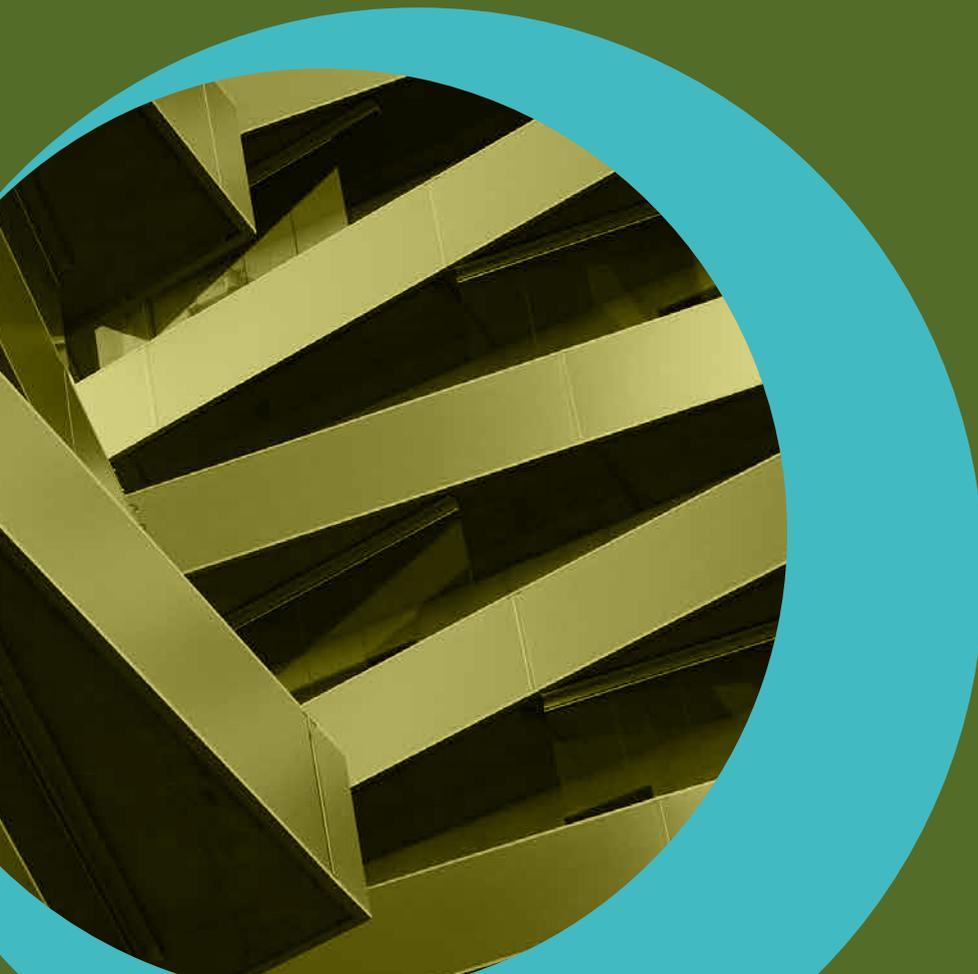


COLECCIÓN INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO PARA TODOS

# Determinación de la agresividad de la corrosión atmosférica en aceros estructurales, acero galvanizado y acero inoxidable en la ciudad de Barranquilla y su área metropolitana

CRISTIAN ANTONIO PEDRAZA YEPES  
OSCAR FABIÁN HIGUERA COBOS  
MÓNICA JOHANNA MONSALVE ARIAS  
JOSÉ LUIS CANO GÓMEZ  
HEBERT ALEJANDRO GUTIÉRREZ PEÑA



COLECCIÓN INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO PARA TODOS

# **Determinación de la agresividad de la corrosión atmosférica en aceros estructurales, acero galvanizado y acero inoxidable en la ciudad de Barranquilla y su área metropolitana**

CRISTIAN ANTONIO PEDRAZA YEPES

OSCAR FABIÁN HIGUERA COBOS

MÓNICA JOHANNA MONSALVE ARIAS

JOSÉ LUIS CANO GÓMEZ

HEBERT ALEJANDRO GUTIÉRREZ PEÑA



Sello Editorial  
**UNIVERSIDAD  
DEL ATLÁNTICO**

Pedraza Yepes, Cristian Antonio; Higuera Cobos, Oscar Fabián; Monsalve Arias, Mónica Johanna; Cano Gómez, José Luis; Gutiérrez Peña, Hebert Alejandro.

Determinación de la agresividad de la corrosión atmosférica en aceros estructurales, acero galvanizado y acero inoxidable en la ciudad de Barranquilla y su área metropolitana / -- Barranquilla

: Sello Editorial Universidad del Atlántico, 2020.

90 p. : il. ; 24 cm.

(Colección *Investigación y desarrollo para todos*. Facultad de Ingeniería de la Universidad del Atlántico)

Incluye referencias bibliográficas (p. 83-87)

ISBN

1. Ingeniería mecánica

(348.8 R673 18 ed.) (CO-BrUNB)



Sello Editorial  
UNIVERSIDAD  
DEL ATLÁNTICO

www.unitlantico.edu.co  
Kilómetro 7, Antigua Vía a Puerto Colombia.  
Barranquilla, Colombia.

© 2020, Sello Editorial Universidad del Atlántico.  
ISBN 978-958-5131-78-1

*Coordinación editorial*  
Sonia Ethel Durán.

*Asistencia editorial*  
Estefanía Calderón Potes.

*Diseño y diagramación*  
Joaquín Camargo Valle.

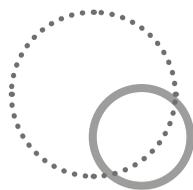
*Revisión y corrección*  
Lorenzo Elejalde.

Impreso y hecho en Barranquilla, Colombia.  
Ditar S.A. www.ditar.co  
Kilómetro 7, Vía a Juan Mina.  
Parque Industrial Clavería.

Printed and made in Barranquilla, Colombia.



Esta obra se publica bajo una licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0). Esta licencia permite la distribución, copia y exhibición por terceros de esta obra siempre que se mencione la autoría y procedencia, se realice con fines no comerciales y se mantenga esta nota. Se autoriza también la creación de obras derivadas siempre que mantengan la misma licencia al ser divulgadas.



***La presente colección es posible gracias a las siguientes autoridades académicas de la Universidad del Atlántico:***

**José Rodolfo Henao Gil**

Rector

**Leonardo Niebles Núñez**

Vicerrector de Investigaciones, Extensión y Proyección Social

**Danilo Hernández Rodríguez**

Vicerrector de Docencia

**Mariluz Stevenson**

Vicerrectora Financiera

**Josefa Cassiani Pérez**

Secretaria General

**Miguel Caro Candezano**

Jefe del Departamento de Investigaciones

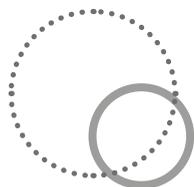
***Agradecimientos especiales***

***Facultad de Ingeniería***

Decana Yussy Arteta Peña

2020





La colección ***Investigación y desarrollo para todos*** es una iniciativa liderada por la Vicerrectoría de Investigaciones, Extensión y Proyección Social de la Universidad del Atlántico, pensada como herramienta para la divulgación de la investigación y el conocimiento que se genera en el Caribe colombiano.



# Contenido

<b>Prefacio .....</b>	<b>13</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>15</b>
<b>Marco referencial .....</b>	<b>17</b>
Antecedentes.....	17
Fenómeno de la corrosión.....	19
Tipos de corrosión.....	22
Corrosión atmosférica .....	22
Factores que afectan la corrosión atmosférica .....	23
<b>Metodología experimental .....</b>	<b>29</b>
Revisión de la literatura .....	30
Diseño experimental.....	30
Fabricación y ubicación de paneles .....	37
<i>Selección de las zonas</i> .....	37
Paneles de exposición.....	38
Materiales .....	39
<i>Aceros empleados en el estudio.</i> .....	39
Preparación de las probetas.....	42
Preparación y ubicación de los captadores .....	44
Pasta de plomo .....	45

Vela húmeda .....	46
Recolección de datos.....	47
Determinación de la pérdida de peso .....	48
Análisis estadístico y caracterización de la corrosión.....	49
Clasificación ambiental .....	52
Análisis químico de sulfatos y cloruros.....	52
<b>Resultados y discusión .....</b>	<b>56</b>
Análisis de varianza y modelos estadísticos.....	58
Clasificación de las categorías de contaminación.....	66
<i>Tasa de deposición de cloruros y sulfatos .....</i>	<i>66</i>
Humedad relativa y temperatura promedio .....	69
<i>Tiempo de humectación calculado .....</i>	<i>71</i>
Clasificación de las zonas de estudio .....	71
Velocidad de corrosión .....	72
<b>Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>81</b>
<b>Los autores.....</b>	<b>83</b>

## Índice de figuras

Figura 1. Celda de corrosión.....	21
Figura 2. Tipos de corrosión.....	22
<b>Figura 3.</b> Estructura general del proyecto .....	30
<b>Figura 4.</b> Estructura general del proceso o sistema .....	32
<b>Figura 5.</b> Matriz de diseño de un experimento 2x2 .....	33
<b>Figura 6.</b> Matriz de diseño de un experimento 4 x 2 .....	35
<b>Figura 7.</b> Croquis de las áreas seleccionadas .....	38
<b>Figura 8.</b> Panel con las probetas .....	39
<b>Figura 9.</b> Especificaciones de las probetas.....	42
<b>Figura 10.</b> Probetas oxidadas de acero ASTM A572 .....	43
<b>Figura 11.</b> Probeta decapada de acero ASTM A572.....	44
<b>Figura 12.</b> Captadores de sulfatos (a) y cloruros (b).....	47
<b>Figura 13.</b> Balanza empleada .....	48
<b>Figura 14.</b> Diagrama de Pareto .....	50
<b>Figura 15.</b> Esquema general del análisis estadístico .....	52
<b>Figura 16.</b> Funcionamiento del TXRF .....	53
<b>Figura 17.</b> Equipo de fluorescencia de rayos X S2 PICOFOX.....	54
<b>Figura 18.</b> Pérdida de masa en el acero ASTM A36 (a) desnudo y (b) galvanizado .....	56
<b>Figura 19.</b> Pérdida de masa en el acero ASTM A572 (a) desnudo y (b) galvanizado .....	57
<b>Figura 20.</b> Pérdida de masa en el acero AISI 304.....	57
<b>Figura 21.</b> Diagrama de Pareto para ASTM A36, (a) zona 1 y (b) zona 2 .....	60
<b>Figura 22.</b> Diagrama de Pareto para ASTM A36, (a) zona 3 y (b) zona 4.....	60
<b>Figura 23.</b> Diagrama de Pareto para ASTM A572, (a) zona 1 y (b) zona 2.....	61
<b>Figura 24.</b> Diagrama de Pareto para ASTM A572, (a) zona 3 y (b) zona 4.....	61

<b>Figura 25.</b> Resultados obtenidos con el modelo teórico para el ASTM A36 (a) desnudo y (b) galvanizado .....	64
<b>Figura 26.</b> Resultados obtenidos con el modelo teórico para el ASTM A572 (a) desnudo y (b) galvanizado .....	65
<b>Figura 27.</b> Comparación de los resultados experimentales y el modelo teórico para los aceros (a) ASTM A36 y (b) ASTM A572 .....	66
<b>Figura 28.</b> Tasa de deposición de sulfatos vs. tiempo para cada zona de estudio .....	68
<b>Figura 29.</b> Tasa de deposición de cloruros vs tiempo para cada zona de estudio .....	69
<b>Figura 30.</b> Velocidad de corrosión del ASTM A36 vs. tiempo (a) teórica y (b) experimental en cada zona estudiada.....	73
<b>Figura 31.</b> Velocidad de corrosión del ASTM A572 vs. tiempo (a) teórica y (b) experimental en cada zona estudiada.....	74
<b>Figura 32.</b> Velocidad de corrosión vs. tasa de deposición de cloruros para los aceros ASTM A36 y ASTM A572.....	75
<b>Figura 33.</b> Velocidad de corrosión vs. tasa de deposición de sulfatos para los aceros ASTM A36 y ASTM A572 .....	76
<b>Figura 34.</b> Velocidad de corrosión del ASTM A36 galvanizado vs. tiempo en cada zona estudiada.....	77
<b>Figura 35.</b> Velocidad de corrosión del ASTM A572 galvanizado vs. tiempo en cada zona estudiada.....	77
<b>Figura 36.</b> Velocidad de corrosión del AISI 304 vs. tiempo en cada zona estudiada.....	78
<b>Figura 37.</b> Comparación de la velocidad de corrosión del AISI 304 y los aceros galvanizados .....	79
<b>Figura 38.</b> Velocidad de corrosión vs. tasa de deposición de cloruros para los aceros ASTM A36G, ASTM A572G y AISI 304.....	80
<b>Figura 39.</b> Velocidad de corrosión vs. tasa de deposición de sulfatos para los aceros ASTM A36G, ASTM A572G y AISI 304.....	80

## Índice de tablas

<b>Tabla 1.</b> Factores empleados en el diseño .....	35
<b>Tabla 2.</b> Matriz de diseño experimental simplificada .....	36
<b>Tabla 3 .</b> Composición porcentual de las probetas de acero ASTM A36.....	40
<b>Tabla 4.</b> Composición porcentual de las probetas de acero ASTM A572 Gr 50 .....	41
<b>Tabla 5.</b> Composición química del acero inoxidable austenítico AISI 304 .....	41
<b>Tabla 6.</b> Programa de colocación y recogida de las muestras.....	48
<b>Tabla 7.</b> Características de la balanza empleada.....	49
<b>Tabla 8.</b> Resultados del análisis de varianza para el acero A36, zona 1 .....	59
<b>Tabla 9.</b> Valores predichos de pérdida de masa para el acero A36, zona 1 .....	62
<b>Tabla 10.</b> Coeficientes de los modelos estadísticos desarrollados para el ASTM A36.....	63
<b>Tabla 11.</b> Coeficientes de los modelos estadísticos desarrollados para el ASTM A572.....	63
<b>Tabla 12.</b> Clasificación de cloruros en las atmósferas según la norma ISO 9223:1992.....	67
<b>Tabla 13.</b> Clasificación de sulfatos en las atmósferas según la norma ISO 9223:1992.....	67
<b>Tabla 14.</b> Datos de humedad relativa y temperatura promedio (Soledad) .....	70
<b>Tabla 15.</b> Datos de humedad relativa y temperatura promedio (Barranquilla) .....	70
<b>Tabla 16.</b> Datos de humedad relativa y temperatura promedio (Juan de Acosta).....	70
<b>Tabla 17.</b> Categorías de corrosión atmosférica.....	71
<b>Tabla 18.</b> Clasificación de las zonas geográficas estudiadas .....	72





## Prefacio

La corrosión atmosférica es un fenómeno de origen electroquímico que resulta de la interacción de un material con el ambiente que lo rodea, lo cual genera su deterioro y se traduce en costos adicionales para la actividad industrial. No obstante, a pesar de su influencia, no se han realizado investigaciones que permitan predecir los efectos del fenómeno corrosivo a nivel local. Por esta razón, el presente trabajo estudió la agresividad de la corrosión atmosférica en Barranquilla y su área metropolitana mediante una investigación de campo durante cuatro meses con diferentes aceros comerciales – ATM A36, ASTM A572, AISI A304, ASTM A36 galvanizado y ASTM A572 galvanizado – en cuatro zonas geográficas distribuidas en la ciudad. Nuestro propósito fue calcular la pérdida de masa debida a efectos corrosivos en estas ubicaciones, teniendo en cuenta características tales como la cercanía al mar o los contaminantes presentes en el aire. Para ello, se elaboró un programa experimental de medida basado en un diseño factorial multinivel, en el cual se evaluó como variable de salida la pérdida de masa asociada a la corrosión atmosférica y como factores que podrían afectarla el tiempo de exposición, la zona geográfica y el material. Los resultados obtenidos se sometieron a un análisis de varianza con ayuda del paquete STATGRAPHICS® para determinar los factores que ejercen una influencia significativa en dicho fenómeno. Los datos obtenidos como producto del diseño experimental indicaron que la corrosión atmosférica es un proceso dependiente del tiempo y del material. En consecuencia, pueden ajustarse a una expresión estadística que tenga en cuenta la contribución de estos factores mediante el uso de métodos de regresión.

De forma paralela, se realizó un estudio de agentes contaminantes en las zonas estudiadas a partir de la medición de los iones cloruros y sulfatos presentes en cada ubicación geográfica, mediante los métodos de la vela húmeda [1] y la pasta de peróxido de plomo [2], respectivamente. Las muestras resultantes de la captación se sometieron a análisis químico para determinar las tasas de deposición de iones propias de cada zona, y luego se realizó la clasificación de la agresividad de los ambientes teniendo en cuenta sus datos meteorológicos y aplicando la norma ISO 9223:2012 [3].

## Introducción

La corrosión se define como la destrucción o el deterioro de un material como consecuencia de una interacción química, electroquímica o metalúrgica entre este y el medio que lo rodea [4]. En la mayoría de los materiales, este fenómeno ocurre principalmente por un ataque químico debido a la presencia de electrones libres dentro del material, generalmente como resultado de procesos de fabricación [5]. Por esta razón, la corrosión afecta severamente la economía, agota recursos y causa fallas prematuras y costosas en la industria [6], lo que genera costos adicionales relacionados con el reemplazo y el mantenimiento de estructuras [7]. Estos costos representan una fracción importante del producto interno bruto (PIB) de algunas naciones: 3,1 % en USA [8], 4-5 % en Reino Unido [6], 4 % en Colombia y 8 % en Perú [8], con una media que oscila entre 3,5 % y 4,5 % en la mayoría de los países industrializados [6].

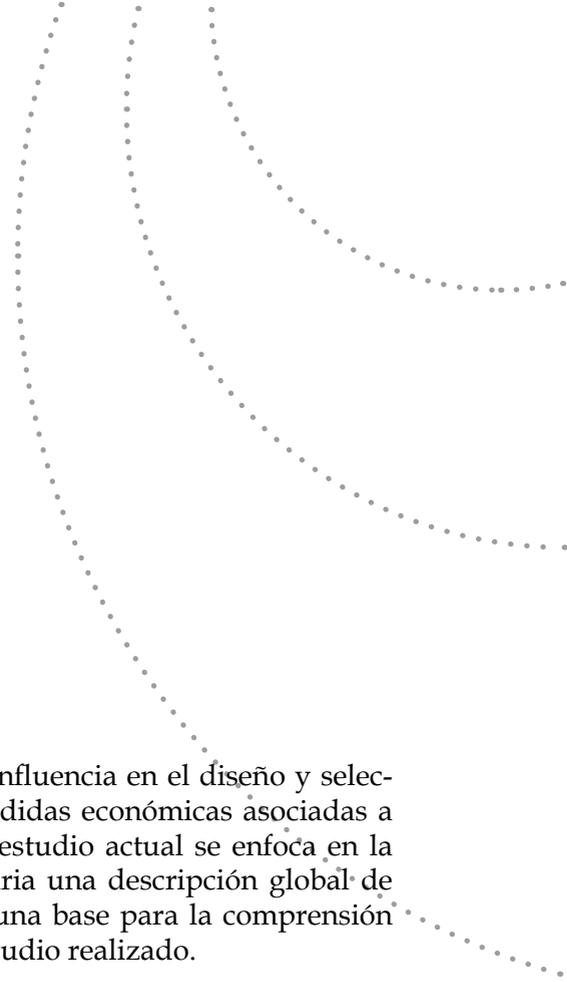
Además de dichos costos, la corrosión también afecta la seguridad del personal – por fallos fatales en medios de transporte, desgaste en bidones que almacenan residuos radiactivos, escapes en tuberías de alta presión o temperatura – o incluso puede ocasionar directa o indirectamente la pérdida de vidas humanas [9]. Por ello, la prevención de este fenómeno tiene beneficios importantes, como un mayor tiempo de vida de la máquina, la disminución de los periodos de mantenimiento y costos asociados, la mejora de su diseño, y la reducción de accidentes vinculados a su funcionamiento [5].

Entre los tipos de corrosión, la corrosión atmosférica ha sido objeto de estudio desde hace algunos años por el daño que causa en los materiales,

especialmente en aceros. Este problema ha tomado mayor relevancia gracias al uso de estructuras y tuberías de acero, las cuales están sometidas a ambientes muy agresivos, ya sea a la intemperie o bajo tierra. Para analizar este tipo de corrosión, se han realizado investigaciones [10-17] que describen el comportamiento de los metales expuestos a determinadas características ambientales, con el fin de seleccionar un método adecuado de protección y los materiales idóneos teniendo en cuenta las propiedades corrosivas del ambiente, así como predecir la interacción del metal de manera que se pueda programar su mantenimiento o reemplazo. Aunque estos estudios sobre la corrosión atmosférica permiten establecer una relación entre la pérdida de masa que esta produce y los factores mencionados anteriormente, no es posible obtener un modelo unificado que aplique a la totalidad de zonas geográficas globales. En vista de que este proceso es altamente dependiente de las condiciones climáticas locales, el campo de acción de los modelos desarrollados se limita a la zona y ubicación geográfica estudiada durante su elaboración. Además, la ciudad de Barranquilla es un área geográfica donde la corrosión ocurre de forma agresiva [18], por lo que se hizo necesario cuantificar la magnitud de este fenómeno para reducir los costos asociados a la corrosión atmosférica de Barranquilla y su área metropolitana.

Para este fin, el presente estudio empleó los aceros comerciales más comunes en la industria local (ASTM A36, ASTM A572, AISI A304, ASTM A36 galvanizado y ASTM A572 galvanizado) [19], sometidos a diversas condiciones ambientales presentes en la ciudad de Barranquilla, para determinar la pérdida de masa de estos materiales asociada al fenómeno corrosivo. Además, se realizó una clasificación de la atmósfera en cada zona estudiada a partir de la captación de iones cloruro y sulfato en estas ubicaciones. Con los resultados de este trabajo se obtuvo un modelo estadístico que permite predecir los efectos de la corrosión en Barranquilla, el cual es de gran utilidad en la actividad industrial, ya que los ingenieros buscan que los equipos y las estructuras permanezcan en las mejores condiciones durante su ciclo de vida útil, es decir, que desempeñen la función para la cual fueron diseñados durante el tiempo que especifica el fabricante, logrando reducir de esta manera los costos operativos y de mantenimiento.

Mediante este trabajo se desarrolló una herramienta útil para predecir el deterioro por corrosión atmosférica de los aceros estructurales e inoxidables utilizados en Barranquilla y su área metropolitana y que ayudan a las labores de mantenimiento.



## Marco referencial

La corrosión es un fenómeno con fuerte influencia en el diseño y selección de materiales, y puede producir pérdidas económicas asociadas a la mala práctica de diseño. Dado que el estudio actual se enfoca en la caracterización de la corrosión, es necesaria una descripción global de este proceso, con el fin de proporcionar una base para la comprensión — desde el punto de vista teórico — del estudio realizado.

### Antecedentes

Con el fin de prevenir el fenómeno corrosivo, se han realizado múltiples investigaciones orientadas a establecer relaciones entre la magnitud de la corrosión atmosférica y los factores que la promueven [7], buscando predecir — y por ende controlar — este fenómeno. Los resultados obtenidos hicieron evidente que la corrosión depende fuertemente del tiempo de exposición a la atmósfera corrosiva, además de factores climáticos como la humedad relativa del aire, la temperatura y la presencia de contaminantes en la atmósfera [5], [17], [20].

Dado su amplio uso en actividades industriales, el acero constituye uno de los materiales con mayor cantidad de estudios sobre el efecto de la corrosión atmosférica [10], [12], [15-18], [21-24], en los cuales se ha evaluado su comportamiento cuando se expone de forma prolongada a diferentes condiciones ambientales. Dichos estudios han demostrado que la pérdida de masa como resultado de la corrosión sigue una tendencia definida con respecto al tiempo de exposición del material, y expusieron

la influencia de los iones cloruro y sulfato presentes en la atmósfera en el fenómeno de la corrosión.

Echeverría *et al.* [25] determinaron el efecto de dichos iones en la corrosión atmosférica, empleando los métodos de la pasta de plomo, el de la vela seca y el de la vela húmeda, los cuales utilizan captadores para determinar la velocidad de deposición de estos iones y obtener correlaciones cuando los contaminantes actúan de manera conjunta en un mismo captador; los iones captados varían de acuerdo con el método utilizado [26]:

- En el *método de la pasta de plomo* se captan óxidos de azufre y otros compuestos de azufre con características ácidas sobre superficies alcalinas de platos.
- En el *método de la vela húmeda o de la bujía húmeda* se captan cloruros. Este captador se encuentra formado por un frasco que contiene glicerina, y en el cual se inserta además un tubo de material inerte, cubierto con gasa quirúrgica.
- En el *método de la vela seca* se determina la velocidad de deposición de iones cloruros. Este captador consiste en un lienzo rectangular que posee en los extremos de sus partes más estrechas un dobladillo que permite pasar una varilla con la que se distiende y sujeta el lienzo.

Estos trabajos encontraron que existen diferencias importantes en las velocidades de deposición entre captadores, tanto para iones cloruro como para iones sulfato, y se obtuvieron correlaciones cuando ambos contaminantes se determinaron de manera conjunta en un mismo captador.

Por otra parte, Pizarro *et al.* [14] expusieron varios materiales a condiciones atmosféricas en una locación bajo diferentes circunstancias para determinar el comportamiento de la corrosión en estos metales, obteniéndose modelos matemáticos que describen dicho comportamiento en los materiales y condiciones ambientales estudiados. En esta investigación se encontró que el acero galvanizado es más resistente a la corrosión que el acero aleado, y que la corrosión en este último, para los ambientes estudiados, no se ajusta a una recta cuando se grafica en una escala doblemente logarítmica. Según el autor, es muy probable que, a mayores tiempos de exposición, esta corrosión se ajuste a una recta. Además, se encontró que la corrosión de estos metales en el ambiente marino es ma-

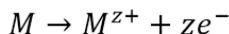
yor, por lo cual se concluye que los iones cloruro que están presentes en la brisa marina de la costa intervienen directamente en el efecto de la corrosión del medio ambiente.

Para determinar el efecto corrosivo del ambiente en varias estaciones del año se emplean métodos estadísticos a partir de información meteorológica. Uno de estos métodos es el CLIMAT [9], en el que se estudian varios materiales que se exponen a condiciones atmosféricas de diferentes locaciones en varias circunstancias para determinar el comportamiento de la corrosión en estos metales, obteniéndose modelos estadísticos que describen correlaciones de velocidad de corrosión, teniendo en cuenta factores de los sitios de muestreo como temperatura, humedad relativa y concentración de cloruros y sulfatos. De un estudio anterior realizado mediante este método [26], se concluyó que hubo una mayor agresividad hacia los materiales estudiados (acero SAE 1016, acero galvanizado en caliente y aluminio 99,9 %) para las estaciones costeras de enero a mayo de 2007, lo cual parece tener relación con las mayores concentraciones de cloruros medidas en estos periodos. De este mismo estudio, se obtuvo que las atmósferas más agresivas para el acero al carbono fueron las marinas y la industrial, mientras que para el acero galvanizado y para el aluminio, las más agresivas fueron las de influencia marina; además, la corrosión del acero al carbono en sitios con influencia marina aumenta con el tiempo, sin estabilizarse, contrario a lo ocurrido en los sitios de muestreo de carácter rural e industrial. En la mayoría de las estaciones se observa mayor corrosión en el acero al carbono, y en todos los casos la corrosión del aluminio es muy baja, aunque debe precisarse que, en este último, a diferencia de los otros dos materiales, la corrosión es de tipo localizado y no generalizado.

## **Fenómeno de la corrosión**

La corrosión no es más que una reacción química producto de la unión del material con el oxígeno, es decir, la corrosión es un deterioro observado en un objeto metálico a causa de un alto impacto electroquímico de carácter oxidativo; así, la velocidad degenerativa de dicho material dependerá de la exposición al agente oxidante [4]. Este concepto reconoce que los metales no son los únicos materiales que se corroen, pues también existe el deterioro por corrosión de otros materiales tales como la cerámica, los plásticos, etc.; además, pueden existir cambios no visibles en el material. Sin embargo, el material puede fallar inesperadamente a

causa de ciertos cambios en su estructura interna. La característica fundamental de este fenómeno es que solo ocurre en presencia de un electrolito, ocasionando regiones plenamente identificadas, llamadas anódicas y catódicas: una reacción de oxidación es una reacción anódica en la cual los electrones son liberados, según la (Reacción 1):



(Reacción 1)

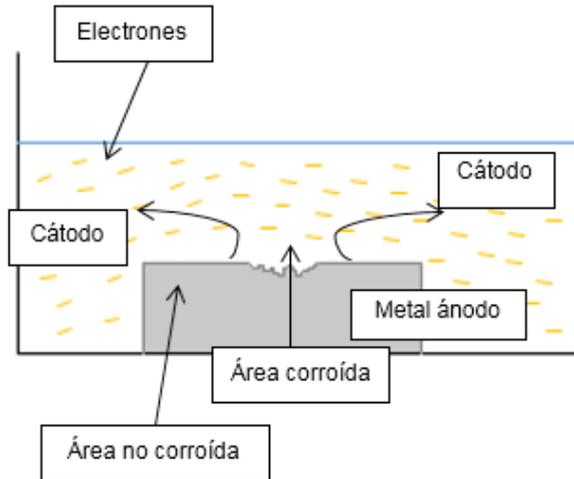
Donde  $M$  corresponde al metal,  $e$  a los electrones, y  $z$  es un entero positivo. Dichas partículas con carga negativa se mueven hacia regiones catódicas aledañas; de esta forma, se produce la disolución del metal (corrosión) en la región anódica y, consecuentemente, la inmunidad del metal en la región catódica.

La velocidad a la que un material se corroe es lenta y continúa dependiendo del ambiente en donde se encuentre. A medida que pasa el tiempo se va creando una capa fina de material en la superficie, que va formándose inicialmente como manchas hasta que llegan a aparecer imperfecciones en la superficie del metal [4].

Este mecanismo, analizado desde un punto de vista termodinámico y electroquímico, indica que el metal tiende a retornar al estado primitivo o de mínima energía, que para el caso del hierro corresponde al óxido de hierro (I),  $\text{FeO}$ , y al óxido de hierro (III),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , el cual es conocido en su forma mineral con el nombre de hematita, y es el compuesto producto de la corrosión de los aceros, también llamado herrumbre. Debido a que el acero es una aleación de hierro con carbono, los procesos para su fabricación implican la extracción del metal puro de sus correspondientes óxidos metálicos de la naturaleza; al ser termodinámicamente más inestables que sus formas minerales, los metales que conforman el acero causan que este sea muy susceptible a la corrosión [9].

Para que un material de lugar a la corrosión se requiere de la formación de una celda de corrosión. Las celdas de corrosión se encuentran compuestas por los componentes [6] que se muestran en la Figura 1.

**Figura 1.** Celda de corrosión



Fuente: elaboración propia.

**Ánodo:** es uno de los dos electrodos metálicos presentes en una celda electrolítica, y se representa como el terminal negativo de una celda. En este elemento los electrones son liberados, haciéndolo la parte más reactiva del metal. Los electrones son insolubles en soluciones acuosas y solo se mueven a través de la conexión con el cátodo.

**Cátodo:** es uno de los dos electrodos metálicos en una celda electrolítica, y se representa como el terminal positivo de una celda. La reducción toma lugar en el cátodo y los electrones son consumidos; los electrones son siempre un agente reductor.

**Electrolito:** es la solución eléctrica conductiva que debe estar presente para que ocurra la conducción.

**Conexión metálica:** los dos electrodos se encuentran unidos externamente mediante un conductor metálico. En la notación convencional, la corriente fluye del electrodo positivo (+) al negativo (-), lo cual realmente no ocurre, pues los electrones fluyen en dirección opuesta. El metal proporciona un camino para el flujo de la corriente convencional, el cual es el paso de electrones en la dirección opuesta.

## Tipos de corrosión

El fenómeno de la corrosión se puede clasificar según diversos criterios de origen físico o químico, de los cuales la Figura 2 ilustra los tipos más comunes [6].

**Figura 2.** Tipos de corrosión



*Fuente: elaboración propia.*

De la anterior clasificación, nos enfocamos en la corrosión atmosférica, pues es esta el objeto principal de estudio en el presente trabajo, considerando la gran cantidad de estructuras metálicas que se encuentran expuestas a la atmósfera (edificios, conductores eléctricos, automóviles, entre otros) y los gastos que se generan por su degradación [7].

## Corrosión atmosférica

La corrosión atmosférica es un proceso electroquímico complejo que tiene lugar en las celdas de corrosión, las cuales consisten en un metal base, un electrolito superficial, la atmósfera y los productos de corrosión. A su vez, las características de la atmósfera están determinadas por variables tales como la humedad relativa, la temperatura, la cantidad de sulfatos y cloruros, las precipitaciones, el polvo, la posición del metal expuesto y la ubicación geográfica.

Para que ocurra la corrosión, se requiere la presencia de un electrolito en la superficie del metal. En ausencia de humedad, la cual es el electrolito comúnmente asociado a la corrosión atmosférica, la corrosión en el metal es despreciable. De igual manera, en climas en los que la humedad del aire se encuentra a temperaturas por debajo del punto de congelación del agua o de condensación acuosa en la superficie metálica, la oxidación es despreciable debido a que el hielo es un conductor pobre y no funciona de manera efectiva como un electrolito [27].

### Factores que afectan la corrosión atmosférica

Por ser un proceso electroquímico, la corrosión depende de la presencia de varios factores que afectan en mayor o en menor medida el proceso corrosivo. De estos, el factor determinante en la velocidad de corrosión es la difusión del oxígeno en las capas acuosas: mientras disminuye el espesor de la capa acuosa, aumenta el ataque corrosivo, obteniéndose un valor máximo en un punto intermedio de la capa húmeda. De esta manera, una excesiva disminución en la capa acuosa ocurre una disminución en la velocidad de corrosión debido al aumento en la resistencia eléctrica y a la dificultad de la formación de reacciones de ionización y de disolución del metal.

Según la investigación de González [28], la corrosión atmosférica se vincula con varios de los factores mencionados a través de modelos matemáticos expresados en las siguientes ecuaciones 1 a 6:

$$k = a * \log(t_{exp}) + b \quad (1)$$

$$k = a * t_b + b \quad (2)$$

$$k = a * t_b + b * SO_2 + c \quad (3)$$

$$k = (a * SO_2 + b) * t_{exp} \quad (4)$$

$$k = \pi * (SO_2 + Cl) \quad (5)$$

$$k = C * t^n \quad (6)$$

Donde la pérdida de masa  $k$ , producto de la corrosión, se relaciona con variables como el tiempo de exposición ( $t_{exp}$ ), el tiempo de humectación ( $t_b$ ), la concentración de sulfatos ( $SO_2$ ), la concentración de cloruros ( $Cl$ ) y la humedad relativa ( $W'sr$ ) a través de constantes ( $C, a, b, c, d, e, n$ ).

A continuación, se describe cada uno de estos factores:

**Electrolito.** Uno de los factores más importantes en el proceso corrosivo es el electrolito, el cual usualmente es agua, que puede estar en diversas formas tales como lluvia, niebla, nieve derretida, rocío o humedad alta. Debido a que el electrolito no siempre se encuentra presente, la corrosión atmosférica se considera como un proceso discontinuo y solo tiene lugar durante el tiempo de humectación, que se relaciona con la corrosión mediante la ecuación 7 [27]:

$$K = \sum_L^h t_n V_k(n) \quad (7)$$

Donde:

$K$  = efecto de corrosión acumulado

$t_n$  = tiempo de humectación

$V_k$  = velocidad de corrosión promedio durante los periodos individuales de humedad, la cual está determinada por la composición del electrolito y la temperatura

La película de electrolito formada sobre la superficie del metal en una atmósfera con 86 % de humedad relativa puede ser de 0,01  $\mu\text{m}$  de espesor o 0,01 g/m<sup>2</sup>, y en saturación es de 1  $\mu\text{m}$  de espesor o 1 g/m<sup>2</sup>, según un estudio realizado por Bartoñ *et al.* [29]. En las condiciones de precipitación directa o bruma, los espesores de las capas de humedad son de 10-50  $\mu\text{m}$ . En superficies horizontales, se pueden generar espesores de capa húmeda de hasta 150  $\mu\text{m}$  y muy rara vez de 200  $\mu\text{m}$ . En superficies inclinadas, el espesor de la capa de humedad no debe ser mayor que 100  $\mu\text{m}$ , ya que se tiende a escurrir la humedad.

En condiciones de rocío, los espesores de humedad alcanzan con gran facilidad los 10 g/m<sup>2</sup>. El rocío es más perjudicial que la lluvia debido a que las gotas que se forman no escurren de la superficie metálica, mientras que la lluvia ejerce un lavado y arrastre de los contaminantes que se encuentran en la superficie del metal.

**Humedad relativa del aire (HR).** La humedad relativa es una referencia que indica lo cerca o lo lejos que se encuentra una atmósfera del punto de rocío o saturación. Esta se expresa como la relación entre la presión

parcial de vapor de agua y la presión de saturación del aire en vapor de agua a una misma temperatura, como se muestra en la ecuación 8 [13]:

$$HR = 100 * \frac{P_{H_2O}}{P_S} \quad (8)$$

La humedad relativa tiene un papel fundamental en la corrosión atmosférica, pues si se encuentra por debajo de un nivel determinado, denominado humedad relativa crítica, no aparecerá la película de electrolito sobre la superficie metálica y la corrosión se considerará despreciable. Un estudio realizado por Schikoor [30] demostró, en el caso del hierro, que la velocidad de corrosión es muy significativa cuando su superficie se encuentra visiblemente mojada o se encuentra expuesta a una humedad relativa del 95 %, pero cuando la humedad relativa se encuentra entre 60 y 80 %, esta se vuelve insignificante si la atmósfera se encuentra libre de contaminantes. Si en la atmósfera se encuentran contaminantes, estos reducen el porcentaje necesario de humedad relativa para que ocurra la corrosión y aceleran la velocidad del proceso corrosivo. Algunos de estos ejemplos se enuncian a continuación:

- Con 1 ppm de SO<sub>2</sub>, a 30 °C, Bartoñ *et al.*[29] encontraron que la humedad relativa crítica (HR) está entre 81,5 y 85,5 %.
- Con 100 ppm de SO<sub>2</sub>, Vernon [31] encontró que la humedad relativa crítica (HR) está entre 60 y 70 %,.
- Con 0,3% de SO<sub>2</sub> en el aire, según Sanyal y Bhadwar [11], la humedad relativa crítica (HR) está entre 60 y 80 %.

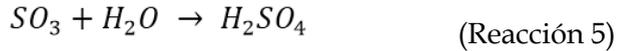
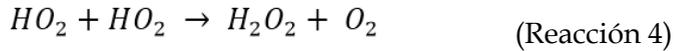
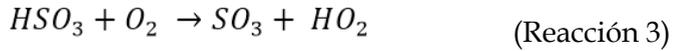
**Contaminantes químicos.** Debido a que aumentan la intensidad del proceso corrosivo de los metales al mejorar la conductividad del electrolito, los agentes corrosivos mayormente estudiados son los siguientes:

SO<sub>2</sub>. El SO<sub>2</sub> es el producto de la combustión del carbón y los combustibles que contienen azufre, los cuales son usados generalmente en industrias metalúrgicas, papeleras, petroquímicas y centrales térmicas. Este contaminante también puede tener su origen en atmósferas marinas y en desechos de actividades microbianas [13].

Según el medio, se observan diversos caminos para la oxidación del  $SO_2$ , incluyendo:

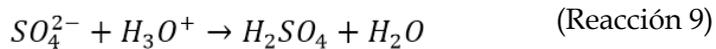
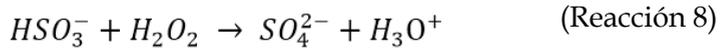
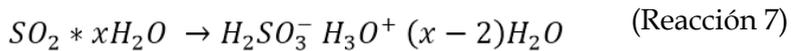
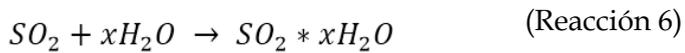
*Para la fase gaseosa*

En la fase gaseosa,  $M$  es cualquier molécula que colisiona con las moléculas generadas de  $HSO_3$ , las cuales pierden energía en dicha colisión. Este proceso se muestra en las reacciones 2 a 5, [13].



*Para la fase acuosa*

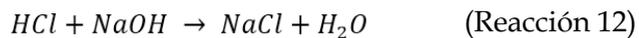
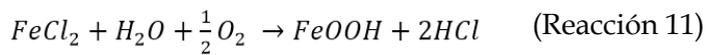
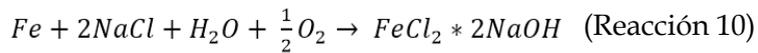
Todos los metales pueden absorber  $SO_2$  desde la atmósfera. En el caso de los aceros, la capa de herrumbre formada absorbe dióxido de azufre incluso en aire seco a  $0^\circ C$ . En presencia de humedad, el  $SO_2$  se disocia formando ácido sulfúrico, como se muestra en las reacciones 6 a 9 [13]:



*NaCl*. La sal común o  $NaCl$ , al igual que otros compuestos iónicos, aumenta la conductividad eléctrica del agua y, por lo tanto, facilita el flujo de electrones durante la corrosión de los metales. Además, reduce la efectividad de las películas protectoras naturales de los metales contra la

corrosión. Finalmente, debido a que esta es una sustancia higroscópica, se requiere una humedad relativa menor a la habitual (80 %) para que ocurra el proceso corrosivo [13]. En un estudio realizado por Preston y Sanyal [32] se demostró que, con una humedad relativa del 70 % y en presencia de estas sales, se presenta la corrosión sobre el acero, la cual se acelera significativamente a mayores niveles de humedad.

Normalmente el NaCl se incorpora al ambiente desde el mar, sus efectos son mayores cerca a la orilla, donde el viento transporta grandes cantidades de sal y ocurre una continua atomización del agua. Las reacciones de la sal con el acero al carbono se describen en las reacciones 10 a 12 [13]:



**Temperatura ambiental.** La velocidad del proceso de corrosión se ve afectada por la temperatura, pero no todos los factores que inciden en la velocidad de corrosión se favorecen con ella; por ejemplo, la humedad relativa disminuye con el aumento de la temperatura, disminuyendo por consiguiente el tiempo de humectación. Si la temperatura es menor a 0 °C, el proceso corrosivo se paraliza, pues el electrolito se solidifica. Por esta razón, en climas muy fríos se tienen bajas velocidades de corrosión [13].

**Tipo de ambiente.** Debido a que la velocidad de corrosión depende de las condiciones locales, las cuales, a su vez, varían de acuerdo con los contaminantes presentes, la temperatura o la humedad relativa del medio, los ambientes generalmente se dividen en las siguientes categorías [27]:

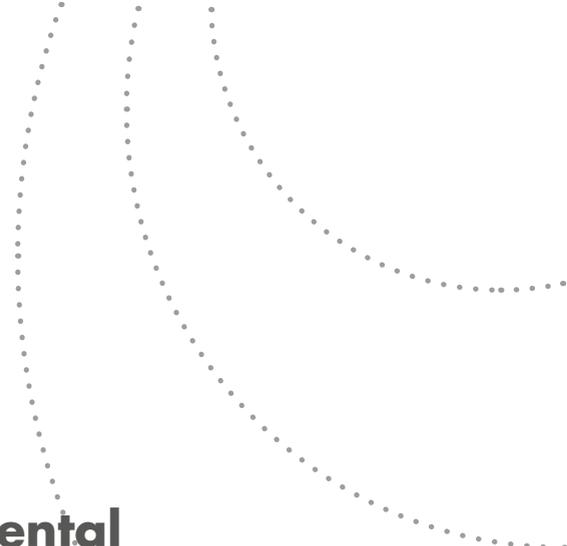
**Rural.** Este tipo de atmósfera se encuentra comúnmente en ambientes con poca presencia de contaminantes químicos tales como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) o compuestos de azufre, los cuales son subproductos de la actividad industrial. Por esta razón, se considera la atmósfera con menor impacto sobre el proceso corrosivo.

*Industrial.* En una atmósfera industrial, todos los tipos de contaminación por azufre (en la forma de dióxido de azufre o sulfato de hidrógeno) son importantes. La quema de combustibles fósiles genera una gran cantidad de dióxido de azufre, que se convierte en ácido sulfúrico y ácido sulfuroso en presencia de la humedad. La combustión de estos combustibles fósiles y productos de residuos peligrosos debería producir solo dióxido de carbono, vapor de agua y gas inerte como productos de la combustión, pero raramente ocurre esto; dependiendo de las impurezas que contenga el combustible fósil, la composición química de los residuos peligrosos incinerados y las condiciones en que se encuentre la combustión, se pueden formar una gran cantidad de otros componentes, tales como cloruro de hidrógeno, cloro, fluoruro de hidrógeno y bromuro de hidrógeno.

El tráfico de la carretera y la producción de energía dirigen la formación de NOX, que puede oxidarse en HNO<sub>3</sub>. Esta reacción tiene un muy bajo rango; por lo tanto, el contenido de HNO<sub>3</sub> y nitratos es muy bajo en la vecindad de la fuente de la emisión. La corrosividad de una atmósfera industrial disminuye con el incremento de la distancia a la ciudad.

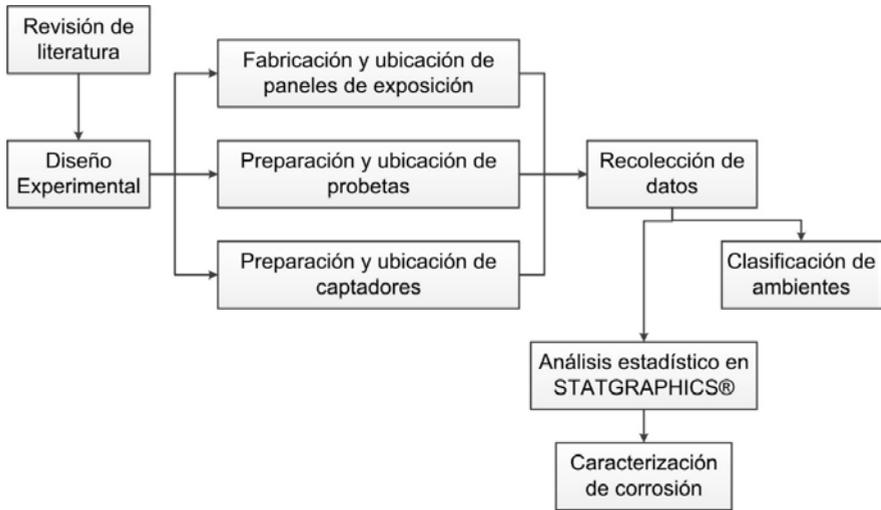
*Marino.* Los ambientes marinos son sujetos del ataque de cloruros como resultado de la deposición de gotas finas de cristales formados por la evaporación del rocío que ha sido llevado por el viento desde el mar. La cantidad de deposición de cloruros del ambiente marino es inversamente proporcional a la distancia de la costa. Entre más cerca se encuentre de la costa, mayor será la deposición y el efecto corrosivo.

Además de las condiciones ambientales anteriormente enunciadas, se observan ambientes urbanos, tropicales (secos o húmedos) y árticos [27]. Sin embargo, estas condiciones ambientales se consideran particulares, y la corrosión en estos sitios generalmente no es muy significativa respecto a las tres atmósferas principales enunciadas.



## Metodología experimental

Esta investigación se considera de tipo experimental, pues las hipótesis se validaron experimentalmente para determinar el comportamiento del fenómeno de corrosión en relación con diferentes factores, buscando establecer la influencia de cada factor en su control. A su vez, la investigación empleó el método hipotético-deductivo, considerando que la relación entre los datos que se obtuvieron en el campo está ligada directamente a la hipótesis [33], y se llevó a cabo siguiendo el alcance correlacional, dado que su finalidad es dar a conocer el grado de relación entre dos o más variables [34]. Por estas razones, se plantearon una serie de pasos con el fin de seguir una secuencia lógica, de manera que fuera posible garantizar el cumplimiento de los objetivos específicos y por ende el objetivo general. La estructura para la realización de esta investigación se expone de manera simplificada en la Figura 3.

**Figura 3.** Estructura general del proyecto

Fuente: Elaboración propia.

## Revisión de la literatura

Como medida inicial, se realizó una consulta de la literatura actual sobre el fenómeno de la corrosión para tener en cuenta desarrollos y prácticas anteriores en la construcción del proyecto. Además, se delimitó el problema y se definió su relevancia para establecer bases sólidas que permitan una evaluación crítica de los resultados obtenidos.

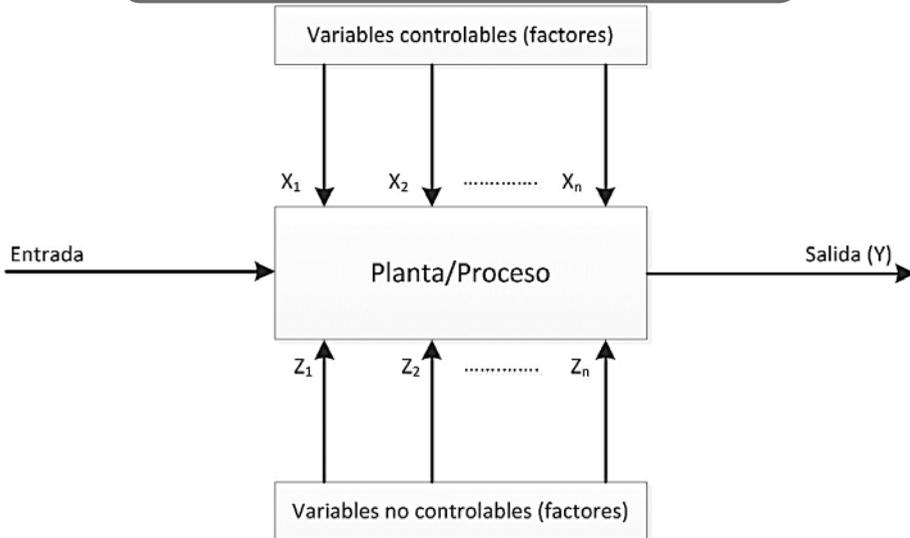
## Diseño experimental

La corrosión atmosférica depende de una serie de factores propios tanto del material como del medio ambiente que lo rodea. Por ende, para caracterizar este fenómeno en una ubicación geográfica dada, se hace necesario cuantificar la relación entre la pérdida de material por corrosión atmosférica y los factores de los cuales depende la corrosión atmosférica. Este tipo de relaciones se obtienen comúnmente a partir de mediciones realizadas de manera experimental, las cuales se diseñan de acuerdo con métodos estadísticos que hacen parte de la técnica general conocida

como Diseño de Experimentos (DOE, por sus siglas en inglés). Esta técnica consiste en el diseño de tareas orientadas a determinar la variación de la salida de un proceso o sistema, conforme se aplican variaciones conocidas a sus variables de entrada, con el fin de obtener resultados de forma efectiva, eficiente y económica [35], [36]. Para lograr este objetivo, el diseño de experimentos integra una serie de métodos estadísticos, los cuales varían ampliamente en función de las variables o el proceso estudiado, con el fin de obtener conclusiones confiables desde el punto de vista estadístico.

En su forma más general, un sistema o proceso se compone de una serie de elementos, los cuales se muestran en la Figura 4. Estos son:

- *Variables respuesta (Y)*. Con estas se conoce el efecto o los resultados de cada prueba experimental. Por esta razón, se consideran las características de la calidad final del producto o el desempeño de un proceso.
- *Factores estudiados*. Son las variables que se investigan en el experimento buscando determinar cómo influyen o afectan a las variables de respuesta. Estos factores se clasifican a su vez en:
  - *Factores controlables ( $X_n$ )*. Son variables de un proceso o característica de los materiales experimentales que se pueden fijar en un nivel dado y controlar durante la operación normal de un proceso.
  - *Factores no controlables o de ruido ( $Z_n$ )*. Son variables o características de materiales y métodos que no se pueden controlar durante el experimento o la operación normal del proceso, tales como las variables ambientales.

**Figura 4.** Estructura general del proceso o sistema

Fuente: Elaboración propia.

A partir de lo anterior, la estrategia principal de todo diseño experimental es determinar la configuración óptima de los factores controlables  $X$  que minimice los efectos indeseados de los factores de ruido  $Z$  y, por ende, reduzca la incertidumbre asociada a estos últimos en los resultados obtenidos.

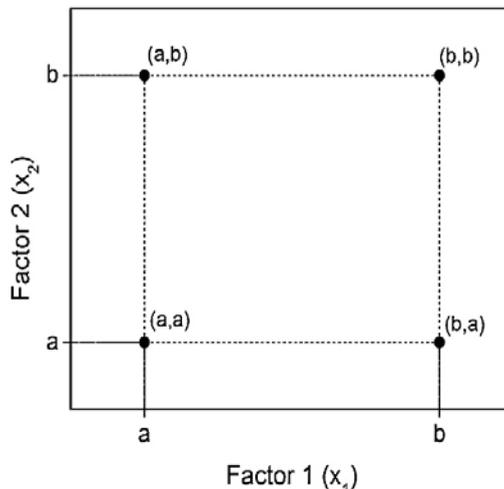
Actualmente, existen múltiples métodos para efectuar un DOE, los cuales difieren en su nivel de complejidad; no obstante, la elección del método más adecuado depende exclusivamente de las condiciones en las que se realiza el experimento. Para experimentos relativamente simples, en los que los factores evaluados no se interrelacionen entre sí, un simple análisis Una Variable a la Vez (OVAT, por sus siglas en inglés), en el cual se varía un factor por cada medida, sería suficiente. Sin embargo, la mayoría de los casos emplean factores a evaluar que se interrelacionan entre sí, por lo que un análisis OVAT no es suficiente, y se recurre entonces a técnicas más avanzadas, entre las cuales se encuentra el análisis factorial, que es ampliamente utilizado en el área de ingeniería y ciencias.

El diseño factorial es un tipo particular de diseño experimental que genera un conjunto de puntos de medida a partir del conocimiento de tres parámetros básicos del diseño:

- El número de factores controlables a evaluar.
- El número de niveles para cada factor, esto es, la cantidad de valores que puede tomar cada factor.
- La cantidad de réplicas del diseño, las cuales corresponden al número de repeticiones que se ejecutará del mismo.

Los puntos de medida así originados conforman la matriz de diseño, la cual contiene la lista de combinaciones o tratamientos que se pueden formar considerando todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores; por ejemplo, cuando se emplean dos factores  $X_1$  y  $X_2$ , con dos niveles cada uno (es decir, un diseño  $2 \times 2$ ), se obtienen cuatro posibles combinaciones en la matriz de diseño, ilustradas en la Figura 5. Este tipo de diseño, en el cual los factores estudiados tienen el mismo número de niveles (dos en este caso), se denomina *diseño factorial  $2k$* , donde  $k$  indica el número de factores que tiene el diseño.

**Figura 5.** Matriz de diseño de un experimento  $2 \times 2$



Fuente: Elaboración propia.

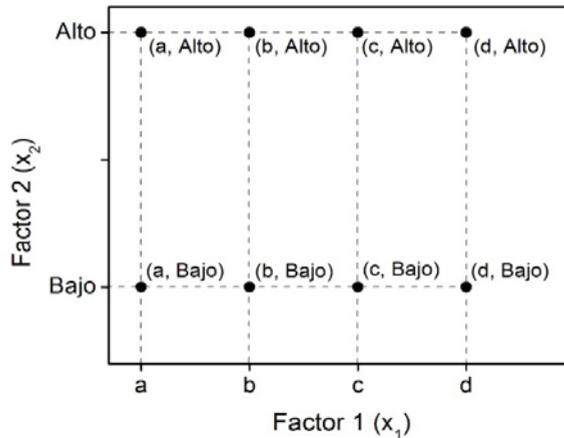
Este tipo de diseños presenta una serie de ventajas con respecto al análisis OVAT, en síntesis [36]:

- Permiten realizar el estudio individual y de interacción de distintos factores.
- Permiten bloquear factores, lo cual es una herramienta para incluir factores sobre los que se piensa que, aunque carezcan de interés en el diseño, pueden tener un efecto en la respuesta del sistema o proceso.
- Son diseños que se pueden aumentar para formar diseños compuestos en caso de que se requiera una exploración más completa de la interacción entre factores.
- Se pueden correr fracciones de diseños factoriales, los cuales son útiles a la hora de descargar de manera económica los factores no importantes del análisis.
- La interpretación y los cálculos asociados se pueden hacer con aritmética elemental.

A pesar de las ventajas que ofrece el diseño  $2k$ , algunas situaciones requieren analizar factores que, por su naturaleza discreta o categórica, tienen un número distinto de niveles. Debido a que se requiere estudiar todas las interacciones posibles, se plantea entonces como alternativa el *diseño factorial mixto o multinivel*, el cual solventa este inconveniente generando una matriz de diseño similar a la de la Figura 6, que corresponde a un caso de diseño  $4 \times 2$  (un factor cuantitativo con cuatro niveles y otro categórico con dos niveles). En general, si se tiene un par de factores con  $n_1$  y  $n_2$  niveles, respectivamente, y se conoce la cantidad de réplicas  $r$  del diseño, es posible determinar la cantidad de elementos  $N_d$  que conforman la matriz de diseño mediante la ecuación 9:

$$N_d = r * (n_1 * n_2) \quad (9)$$

**Figura 6.** Matriz de diseño de un experimento 4 x 2



Fuente: Elaboración propia.

Para aplicar la definición del diseño factorial al presente trabajo, se realizó un estudio con una duración estimada de cuatro meses (mayo-septiembre 2017), en el que se analizó la pérdida de masa por corrosión en función de los factores que se muestran en la Tabla 1. Como la variable de respuesta no tiene un comportamiento lineal con respecto a las variables de entrada (tiempo, tipo de recubrimiento), se descartó inmediatamente el análisis factorial  $2k$  y se implementó un diseño factorial multinivel. Para mejorar la calidad de los resultados, se realizaron tres réplicas del diseño, teniendo en cuenta consideraciones dadas por la literatura [35], al igual que otras de tipo económico.

**Tabla 1.** Factores empleados en el diseño

Factor	Niveles			
Material	ASTM A36	ASTM A572	AISI 304	
Recubrimiento	Desnudo		Galvanizado	
Tiempo	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4
Zona geográfica	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4

Fuente: Elaboración propia.

Para simplificar el diseño, se definió al material y a la zona geográfica como factores de bloque, con el fin de analizar la evolución temporal de la pérdida de masa para un nivel específico de dichos factores, lo que reduce considerablemente la variabilidad de los resultados originada por la presencia de factores no controlables [36]. Adicionalmente, el bloqueo del material permite hacer un análisis ligeramente diferente del acero inoxidable AISI 304, para el cual se realizaron solamente dos réplicas de su diseño factorial, sin tener en consideración el galvanizado de este material (dado que la capa pasiva de este acero cumple una función similar a la capa protectora de zinc). Para los demás bloques, el diseño se realizó con dos factores de análisis por bloque (tiempo y recubrimiento). Esto representa una reducción considerable de la cantidad de elementos a evaluar, obteniéndose una matriz de  $N_d=3*(4*2) = 24$  elementos a evaluar para los bloques de los aceros ASTM A36 y ASTM A572 y  $N_d=2*(4*1) = 8$  elementos para el acero AISI 304, lo que arroja un total de (56 probetas/zona) (4 zonas) = 224 probetas empleadas en el diseño. De esta manera, para cada combinación de zona y material se tiene una matriz de diseño similar a la ilustrada en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Matriz de diseño experimental simplificada

Zona 2		
Tiempo	ASTM A36	
	Desnudo	Galvanizado
30	1	5
	9	13
	17	21
60	2	6
	10	14
	18	22
90	3	7
	11	15
	19	23
120	4	8
	12	16
	20	24

Fuente: Elaboración propia.

## Fabricación y ubicación de paneles

### Selección de las zonas.

Se seleccionaron los siguientes puntos para la realización del estudio, los cuales se muestran en la Figura 7:

- *Zona 1 (Puerto Colombia)*. Se seleccionó por su relativa cercanía al mar Caribe.
- *Zona 2 (Universidad del Atlántico)*. Se seleccionó debido a su condición atmosférica mixta por su cercanía al mar Caribe y a la zona urbana del corregimiento La Playa.
- *Zona 3 (Villa Olímpica, Galapa)*. Se seleccionó por su condición atmosférica mixta, ya que este lugar está ubicado en el casco urbano y además está influenciado fuertemente por las industrias aledañas, incluyendo la zona franca industrial ZOFIA, cementos Ultracem y la zona franca de Galapa ZIGA.
- *Zona 4 (Barrio Hipódromo, Soledad)*. Se seleccionó por su condición atmosférica predominantemente urbana.

**Figura 7.** Croquis de las áreas seleccionadas

Fuente: Elaboración propia.

## Paneles de exposición

Los paneles de exposición se elaboraron en madera, pues esta no se ve afectada de manera apreciable por la corrosión atmosférica, de conformidad con los lineamientos de la norma ASTM G50 [37], con las siguientes características principales:

- Panel construido en madera.
- Ángulo a 45° de inclinación para la exposición.
- Aisladores no metálicos para las probetas (preferiblemente PVC).

La Figura 8 muestra el esquema final de la estructura. Se observa la ubicación de las probetas metálicas y los captadores de iones (cloruros y sulfatos), lo cual compone la estación de corrosión.

**Figura 8.** Panel con las probetas



*Fuente: Elaboración propia.*

## **Materiales**

### **Aceros empleados en el estudio.**

Los aceros ASTM A36 y ASTM A572 tienen un uso común en la industria en elementos tales como perfiles, láminas, vigas y placas [19], lo que genera una gran disponibilidad de estos materiales en el mercado; por esta razón, se eligieron para el estudio de los efectos de corrosión ambiental en las zonas especificadas. Adicionalmente, se estudiaron los efectos de la corrosión ambiental en un acero inoxidable, AISI 304, por su disponibilidad en el mercado y su uso industrial, para verificar qué tan agresiva es la atmósfera de estudio en este material. Además, se estudiaron los aceros estructurales mencionados anteriormente después de un proceso de galvanizado, con el fin de determinar la variabilidad de los efectos por

corrosión ambiental en estas condiciones [6]. Las siguientes son las propiedades de cada uno de los aceros que fueron expuestos para el estudio:

- *Acero ASTM A36.* Este acero fue suministrado en forma de planchas de acero al carbono estructural, fabricado bajo las especificaciones de la norma ASTM A36 [38]; fue suministrado por Kael Ingenieros S.A.S. La Tabla 3 resume la composición química de este material, la cual fue entregada por el proveedor.

**Tabla 3** . Composición porcentual de las probetas de acero ASTM A36

Composición química de las probetas de acero ASTM A36 (% en peso)					
C	Mn	P	S	Si	Cu
0,25	1,2	0,04	0,04	0,3	0,2

Fuente: Elaboración propia.

Los aceros al carbono no tienen la propiedad de crear una capa termodinámicamente estable que los proteja de los efectos de la corrosión, como la mayoría de los metales [6]. Es por esta razón que el proceso de oxidación en estos materiales se presenta de una manera acelerada. El mecanismo de corrosión en el acero al carbono se presenta por partículas sólidas en el aire y la adsorción de SO<sub>2</sub> y vapor de agua. La corrosión en estos materiales ocurre de manera uniforme y aumenta cuando partículas de sales higroscópicas como cloruros o sulfatos se asientan en la superficie y forman un electrolito corrosivo, iniciando así el proceso de corrosión [6]. Por esta razón, se aplican en dichos materiales capas protectoras que impidan o ralenticen este proceso de degradación.

- *ASTM A572.* Este acero fue suministrado en forma de placas y es un acero microaleado al niobio-vanadio de alta resistencia y baja aleación, fabricado bajo las especificaciones de la norma ASTM A572 [39]; fue suministrado por Steckerl Aceros S.A.S. La Tabla 4 muestra la composición química de este acero, la cual fue entregada por el proveedor.

**Tabla 4.** Composición porcentual de las probetas de acero ASTM A572 Gr 50

Composición química de las probetas de acero ASTM A572 (% en peso)						
C	Mn	P	S	Si	V	Nb
0,23	1,35	0,04	0,05	0,4	0,01-0.15	0,005-0,05

Fuente: Elaboración propia.

Este tipo de acero tiene las mismas propiedades de resistencia a la corrosión atmosférica que el acero al carbono; sus elementos aleantes le proporcionan una mayor resistencia a la fluencia y una mayor soldabilidad en comparación con el acero ASTM A36.

**Acero galvanizado.** Los aceros ASTM A36 y ASTM A572 fueron sometidos a un proceso de galvanizado en caliente en la empresa Polyuprotec S.A., con un espesor de película del galvanizado entre 40-100 micras en promedio [19]. La capa de zinc provee al metal una protección contra la corrosión en ambientes urbanos y rurales en donde la salinidad y la polución industrial son bajas, al igual que una protección aceptable en ambientes marinos en donde el contacto con el agua de mar no sea directo. No obstante, esta no será efectiva en lugares con SO<sub>2</sub> en cantidades significativas, puesto que la superficie galvanizada será atacada [6].

- *Acero inoxidable austenítico AISI 304.* Este acero fue fabricado bajo las especificaciones de la norma ASTM A276 [40] y fue suministrado por Recortes y Metales S.A.S. La Tabla 5 describe la composición química de este acero, la cual fue entregada por el proveedor.

**Tabla 5.** Composición química del acero inoxidable austenítico AISI 304

Composición química de las probetas de acero AISI 304 (% en peso)						
C	Mn	P	S	SI	Cr	Ni
0,08	2	0,045	0,03	1	18-20	8-10,5

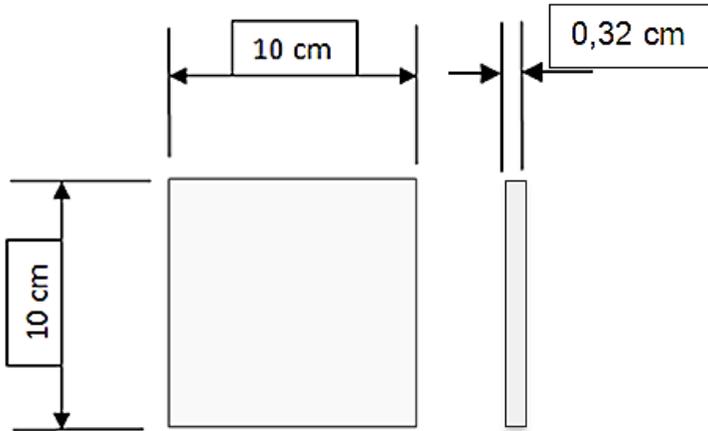
Fuente: Elaboración propia.

Bajo condiciones normales, este tipo de acero crea una capa protectora de óxido (pasivación) cuando está en contacto con el oxígeno, inhibiendo de esta manera la degradación por corrosión. El mecanismo de corrosión para este tipo de acero es la corrosión por picadura, una corrosión localizada que se presenta cuando la capa protectora se rompe en pequeños espacios aislados. Una vez inicia, se acelera el proceso, como resultado de la diferencia de potencial eléctrico entre el área de la capa pasivadora y la picadura activa [6].

### Preparación de las probetas

A partir de la matriz generada por el diseño experimental (véase la Tabla 2), se procedió a la elaboración de las probetas metálicas de cada uno de los materiales estudiados. Dichas probetas corresponden a láminas rectangulares de acero de 10 x 10 cm y 3,2 mm de espesor, como lo indica la Figura 9. Se obtuvieron por corte de placas de acero de 1,2 x 1,2 m a través de un proceso de cizallado en las instalaciones del Centro Nacional Colombo Alemán del Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA).

**Figura 9.** Especificaciones de las probetas



Fuente: Elaboración propia.

Debido a que las probetas presentaban puntos importantes de oxidación al momento del suministro, se realizó una limpieza química, según los lineamientos de la norma ASTM G1-03 [41], la cual establece procedimientos que varían en función del material:

- Para las probetas de acero ASTM A36 y ASTM A572, se realizó un cepillado superficial para eliminar la mayor cantidad de óxido de la superficie, se procedió a desengrasar con agua y detergente y además eliminar las virutas generadas en el cepillado, luego las probetas se enjuagaron con agua destilada para eliminar los residuos de detergente. Después, se procedió a decaparlas utilizando una solución de ácido clorhídrico al 20 %V/V durante 60 minutos, hasta lograr que el óxido se desprendiera completamente [41].
- Para las probetas de acero galvanizado, solo se limpiaron y enjuagaron con alcohol industrial para su posterior embalaje [14].
- Para las probetas de acero inoxidable, se procedió a limpiarlas con alcohol industrial, luego se hizo el decapado en una mezcla de alcohol industrial, percloruro férrico y veinte gotas de ácido clorhídrico durante 15 minutos (véanse las Figuras 10 y 11).

**Figura 10.** Probetas oxidadas de acero ASTM A572



*Fuente: Elaboración propia.*

**Figura 11.** Probeta decapada de acero ASTM A572



*Fuente: Elaboración propia.*

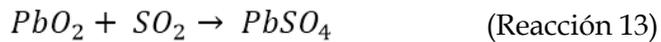
Después de realizar la limpieza química, las probetas se lavaron con agua destilada y alcohol etílico para su posterior embalaje, transporte y ubicación en los paneles de exposición.

## **Preparación y ubicación de los captadores**

Para la determinación de las tasas de deposición de los contaminantes presentes en cada una de las zonas de estudio, se utilizaron los siguientes métodos: (1) pasta de plomo, el cual determina la concentración media del SO<sub>2</sub> en la atmósfera a lo largo de un extenso período, por lo general un mes [2]; (2) vela húmeda, el cual mide la velocidad de deposición de sal sobre una superficie cilíndrica, y se obtiene enrollando alrededor de un tubo de vidrio una tira de gasa cuyos extremos se mantienen sumergidos en agua dentro de un frasco [1]. A continuación, se explica el principio químico y la preparación de los captadores según la norma ISO 9225 [42]:

## Pasta de plomo

En este método, el dióxido de azufre atmosférico ( $SO_2$ ) reacciona con el dióxido de plomo para formar sulfato de plomo. Se hace un análisis de los sulfatos para determinar el contenido de dióxido de azufre que reaccionó con el captador. La tasa de deposición del dióxido de azufre se expresa en miligramos por metro cuadrado por día ( $mg/(m^2 \text{ día})$ ). La reacción 13 expresa el fenómeno:



El reactivo de dióxido de plomo utilizado en este método puede convertir también sulfuros a otros compuestos portadores de azufre, tales como ácido sulfhídrico y mercaptanos en sulfatos. La posición invertida de los captadores está destinada a minimizar la captura de azufre de la precipitación ácida o del aerosol de ácido sulfúrico. El periodo de exposición recomendado es de  $30 \pm 2$  días. Los captadores pueden ser expuestos durante los 120 días posteriores a su preparación. Al concluir el periodo de exposición, los platos se deben cubrir perfectamente y se deben analizar dentro de los siguientes 60 días. La tasa de deposición  $RSO_2$  se obtiene a partir de la cantidad de sulfatos en cada espécimen analizado, de acuerdo con la ecuación 10 [43]:

$$R_{SO_2} = \frac{m_{SO_2} * PM_{SO_2}}{PM_{SO_4} * A * t} \quad (10)$$

Donde la tasa se expresa en miligramos por metro cuadrado día ( $mg/(m^2 \text{ día})$ ), y se calcula a partir de la cantidad de sulfatos determinada por el captador ( $m_{SO_2}$ ), los pesos moleculares ( $PM$ ) del  $SO_2$  y el  $SO_4$  (64 g/mol y 96 g/mol, respectivamente), el área del captador  $A$  y el tiempo de exposición  $t$  en días.

**Preparación de la pasta.** Para la preparación de la pasta de dióxido de plomo se realizó una mezcla con las siguientes proporciones: 900 ml de agua destilada a 3,5 g de goma Xantana. Estas cantidades se mezclaron a 1500 rpm/min con un agitador magnético hasta que se obtuvo una mez-

cla homogénea. Luego, se redujo la velocidad de agitación a 800 rpm/min y se continuó hasta completar dos horas de agitación. Hecho esto, se agregaron 3,5 g de pulpa de papel filtro a 350 ml de la mezcla de agua con la goma Xantana preparada anteriormente. Se procedió a agitar hasta lograr una mezcla suave y uniforme, a la cual se le adicionaron 112 g de dióxido de plomo, aumentando la velocidad de agitación hasta obtener una mezcla homogénea. Para su uso se prepararon placas sobre las cuales se vertieron 16 ml de la mezcla anterior, extendiéndola hasta la orilla de cada plato. Después de esta operación, se colocaron las placas destapadas en un horno tipo mufla a una temperatura de 40-50 °C durante 20 horas. En la Figura 12(a) se aprecia el captador de sulfatos.

## Vela húmeda

En este método, una superficie textil húmeda protegida contra la lluvia, con un área conocida, se expone durante un tiempo especificado; la cantidad de cloruro depositada se determina mediante análisis químico. A partir de los resultados de este análisis, se calcula la tasa de deposición de cloruros  $R_{Cl}$ , expresada en miligramos por metro cuadrado día (mg/(m<sup>2</sup> día)), de acuerdo con la ecuación 11 [1].

$$R_{Cl} = \frac{[Cl^-]}{2 * A * t} \quad (11)$$

Donde la tasa de deposición de cloruros  $R_{Cl}$  se expresa como una función de la concentración de iones cloruro en el captador  $[Cl^-]$  en mg/L, el área de exposición  $A$  [m<sup>2</sup>] y el tiempo de exposición  $t$ , medido en días.

**Preparación de la vela.** La vela húmeda se forma a partir de una mecha insertada en una botella. La mecha consiste en un núcleo central de aproximadamente 25 mm de diámetro hecho de material inerte (polietileno), sobre el cual se extiende una doble capa de gasa tubular quirúrgica o de una banda de gasa quirúrgica. La superficie de la mecha expuesta a la atmósfera será de aproximadamente 100 cm<sup>2</sup>, lo que corresponde a una longitud de mecha de aproximadamente 120 mm. El área expuesta se debe conocer con exactitud. Un extremo de la mecha se inserta en un tapón de goma. El tapón tiene dos orificios adicionales a través de los cuales pasan los extremos libres de la gasa (si se usa gasa tubular, el extremo inferior se corta a lo largo de la gasa hasta que queda aproximadamente 120 mm). Los bordes de los tres agujeros se convierten en un embudo

para que el líquido que corre por la gasa drene a través del tapón. Los extremos libres de la gasa deben ser lo suficientemente largos para alcanzar el fondo de la botella.

El tapón se insertó en el cuello de una botella de polietileno u otro material inerte, con un volumen de aproximadamente 500 ml. La botella contiene 200 ml de una solución de glicerol y agua [40 % (V/V)] con ácido octanoico, añadido para evitar el crecimiento de hongos tales como *Aspergillus Niger*. La solución se compone mezclando 200 ml de glicerol [CHOH (CH<sub>2</sub>OH)<sub>2</sub>] con agua destilada hasta un volumen de 1000 ml. A la solución se le añaden 20 gotas de ácido octanoico (C<sub>8</sub>H<sub>16</sub>O<sub>2</sub>). La Figura 12(b) muestra el captador de cloruros elaborado.

**Figura 12.** Captadores de sulfatos (a) y cloruros (b)



Fuente: Elaboración propia.

## Recolección de datos

Para la toma de datos, se diseñó un programa de colocación y recogida, el cual se describe en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Programa de colocación y recogida de las muestras

Actividad	Día
Ubicación de los paneles de exposición	10-may-17
Ubicación de las muestras de ensayo (probetas metálicas y químicas)	13-may-17
Recolección de probetas (mes 1)	13-jun-17
Recolección de probetas (mes 2)	13-jul-17
Recolección de probetas (mes 3)	13-ago-17
Recolección de probetas (mes 4)	13-sep-17

Fuente: Elaboración propia.

## Determinación de la pérdida de peso

Después de realizar la limpieza y preparación previa de las probetas metálicas, se procedió a pesarlas para obtener sus condiciones iniciales. Para esta tarea se utilizó una balanza analítica Ohaus Pioneer PA3202, la cual se muestra en la Figura 13, y cuenta con las características descritas en la Tabla 7 [44].

**Figura 13.** Balanza empleada

Fuente: [44].

La pérdida de masa  $\Delta m$  se calculó con los datos obtenidos de los pesos de las probetas usando la ecuación 12 [27].

$$\Delta m = m_{inicial} - m_{final} \quad (12)$$

**Tabla 7.** Características de la balanza empleada

Característica	Valor
Capacidad	3200 g
Sensibilidad	10 mg
Linealidad	10mg
Capacidad de repetición (desviación estándar)	20 mg
Tiempo de estabilización	3 s

Fuente: [44]

## Análisis estadístico y caracterización de la corrosión

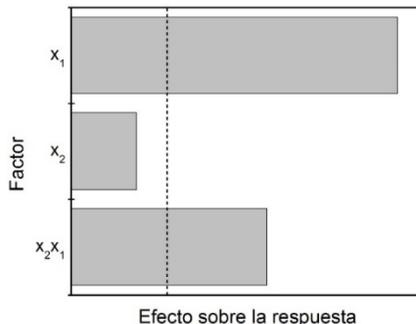
El diseño experimental genera la matriz de diseño, la cual contiene las posibles combinaciones de factores que se deben tener en cuenta para realizar las mediciones. No obstante, los datos obtenidos a partir de este proceso carecen de significado por sí mismos, pues no cuantifican la relación entre los factores estudiados y la variable de respuesta. Por esta razón, se requirió analizar los datos obtenidos del pesaje de las probetas durante los cuatro meses establecidos con el fin de:

- Establecer si los factores y/o su interacción influye de forma notable en la respuesta.
- Calcular si la influencia de los factores y/o la interacción en la respuesta es estadísticamente significativa.
- Establecer un modelo matemático que cuantifique las relaciones validadas en el inciso anterior.

Para lograr los objetivos del presente trabajo, se estableció inicialmente una serie de criterios estadísticos para definir formalmente si la influencia de dichos factores es de interés para el estudio realizado [35]. Para esto, se empleó el Análisis de Varianzas (ANOVA, por sus siglas en inglés), desarrollado por Fisher en 1920 [3], [35], el cual utiliza medidas de dispersión para determinar si la variabilidad de un factor dado influye en la variabilidad total de la salida del sistema, bajo el supuesto de que los datos obedecen a una distribución normal de probabilidad. No obstante, este método se utiliza ampliamente para analizar distribuciones no normales con varianzas entre factores relativamente bajas. A partir de las varianzas de los factores y la salida, el ANOVA calcula para cada factor un estadístico de prueba F, que se compara con la distribución de probabilidad F de Fisher (comúnmente empleada en prueba de hipótesis) para obtener el denominado *valor-P* o *P-value*, el cual define si el factor estudiado es estadísticamente relevante o no para una confiabilidad dada (usualmente del 95 %).

Los resultados del análisis ANOVA se pueden organizar en una serie de herramientas gráficas que facilitan su comprensión; aunque existen varias en la literatura, la más usada es el diagrama de Pareto [36], el cual organiza los efectos según su impacto en la variable de respuesta a partir de los valores calculados por el análisis ANOVA, como se muestra en la Figura 14.

**Figura 14.** Diagrama de Pareto



Fuente: Elaboración propia.

Una vez definidos los factores con influencia relevante en la salida del sistema, los pasos finales en el desarrollo del modelo incluyen el cálculo de los valores predichos de la salida y el ajuste de estos valores a una expresión matemática que relacione los factores estudiados y la salida. Estas tareas se llevan a cabo mediante el análisis residual y la regresión lineal, respectivamente. En el análisis residual, se calculan los valores de la salida para cada combinación de valores en la matriz de diseño, asumiendo que el valor predicho tiene la forma de la ecuación 13 [36].

$$\bar{y}_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, a; j = 1, 2, \dots, b) \quad (13)$$

Donde a y b corresponden a la cantidad de factores a estudiar,  $\mu$ ,  $\tau_i$ ,  $\beta_j$  corresponden a los efectos representativos de cada factor, al igual que al efecto de su interacción, que se calculan a partir de los resultados del análisis ANOVA. De aquí, se definen los valores residuales como la diferencia existente entre los valores medidos realmente y los predichos, tal como se describe en la ecuación 14 [35].

$$e_{ij} = y_{ij} - \bar{y}_{ij} \quad (14)$$

Por otro lado, la regresión lineal ajusta los valores predichos a un modelo que expresa la respuesta como una función lineal de los factores y su interacción, el cual, aplicado a dos factores  $x_1$  y  $x_2$ , da como resultado el modelo de la ecuación 15.

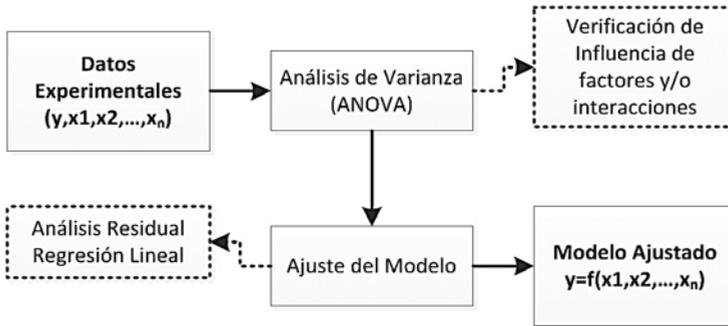
$$y_{ij} = \alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 x_1 x_2 \quad (15)$$

Donde los coeficientes  $\alpha_i$  se denominan coeficientes de regresión, los cuales se determinan a partir de los valores predichos ordenados en un vector columna  $Y$  y los valores de cada factor correspondientes a la respuesta predicha (organizados en una matriz  $X$ ), mediante la ecuación 16 [36].

$$\alpha = (X'X)^{-1}X'y \quad (16)$$

En la cual  $\alpha$  es el vector columna que contiene los coeficientes de regresión del modelo. Además de estos coeficientes, la regresión lineal produce como resultado el valor  $R^2$ , el cual se interpreta en términos generales como la proporción de la variabilidad en los datos “explicada” por el modelo obtenido (esto es, la cercanía del modelo a los datos obtenidos), cuyo valor oscila entre 0 y 1, siendo 1 un ajuste perfecto a los datos. La Figura 15 resume los pasos principales empleados en el análisis del diseño.

**Figura 15.** Esquema general del análisis estadístico



Fuente: Elaboración propia.

## Clasificación ambiental

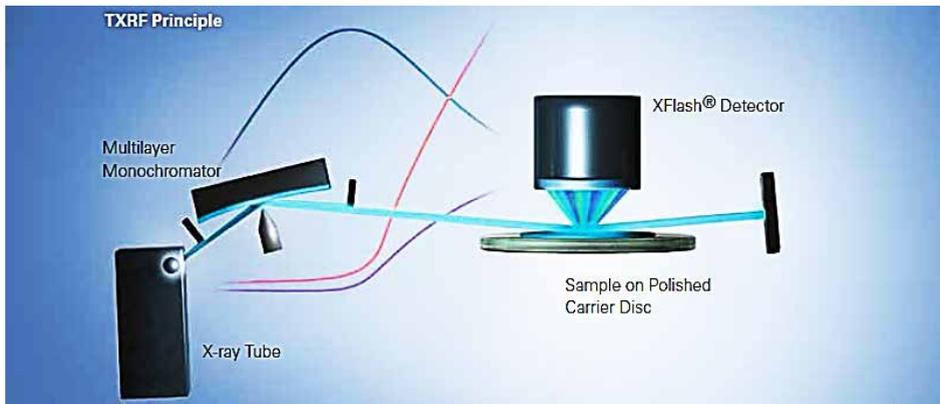
### Análisis químico de sulfatos y cloruros

La clasificación ambiental de las zonas estudiadas requiere conocer de antemano las tasas de deposición de iones cloruro y sulfato en cada mes, y es por esta razón que se emplearon captadores de estos iones. Sin embargo, establecer conclusiones a partir de la concentración medida por estos requiere dos elementos: 1) conocer dicha concentración y 2) calcular la tasa de deposición equivalente. Debido a que cada ion tiene caracte-

rísticas fisicoquímicas diferentes, los métodos de obtención de la tasa de deposición suelen ser diferentes para cada uno.

El análisis químico de iones sulfato se realizó mediante Espectroscopía de Rayos X por Reflexión Total (TXRF, por sus siglas en inglés) en el laboratorio de catálisis y bioprocesos de la Universidad del Atlántico. La concentración se determinó a partir del análisis de una mezcla que contenía entre 30 y 50 mg de la muestra triturada, 2,5 ml de Tritón (un agente tensoactivo que mantiene en suspensión las partículas) y 10  $\mu$ L de Ytrio. La Figura 16 muestra el equipo empleado, denominado así por su principio de funcionamiento (ilustrado en la misma figura). Allí, los rayos X que inciden sobre la muestra generan un espectro de fluorescencia policromático (de múltiples longitudes de onda), el cual se descompone en función de sus longitudes de onda al difractarse en un monocristal de espaciado conocido. El haz difractado para cada posición angular del monocristal incide sobre un detector, generalmente un detector de gas proporcional de flujo o de centelleo, que convierte los fotones en impulsos eléctricos [45].

**Figura 16.** Funcionamiento del TXRF



Fuente: [46].

Este espectro policromático se genera por la suma de dos fenómenos que ocurren al interior de los átomos que conforman la muestra:

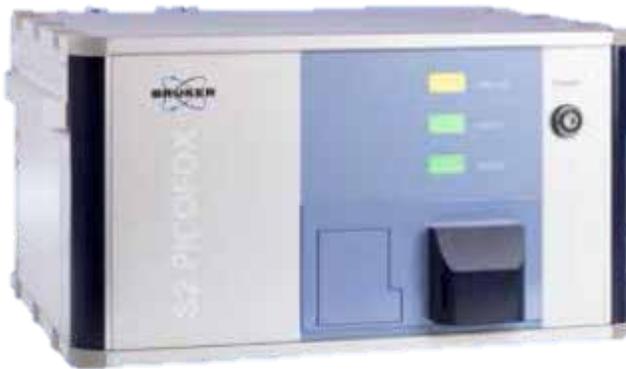
- Un proceso primario de *excitación*, que ocurre cuando choca un electrón o fotón X incidente con un electrón de las capas internas

de los átomos, lo que genera espacios vacíos en un nivel de baja energía.

- Un proceso de *emisión*, en el cual los átomos excitados previamente tienden a volver inmediatamente a su estado inicial, mediante la producción de saltos de electrones de niveles más externos, para ocupar el espacio en niveles más bajos producidos por la excitación. Esto conlleva un desprendimiento de energía, que es igual a la diferencia de energía de los niveles entre los que se produce el salto electrónico, en forma de radiación electromagnética correspondiente a la región de rayos X, la cual se denomina *radiación X secundaria o radiación de fluorescencia*, cuyo espectro es propio de cada elemento que conforma la muestra de análisis.

La radiación de fluorescencia producida pasa a un espectrómetro similar al de la Figura 17, el cual se encarga de identificar la longitud de onda o energía de la radiación característica de cada elemento presente en la muestra, y también identifica la intensidad de cada longitud de onda para determinar su concentración.

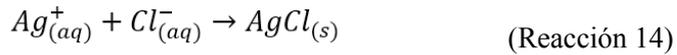
**Figura 17.** Equipo de fluorescencia de rayos X S2 PICOFOX



Fuente: [46].

El ensayo de iones cloruro se realizó en el laboratorio de hidráulica e ingeniería ambiental de la Universidad del Norte. En los iones cloruro la concentración se obtiene indirectamente a partir de titulación química, contemplada en la norma ASTM D512-12 [47], la cual establece la *argentometría* como el procedimiento más adecuado para esta labor [46]. Dicho

proceso permite obtener la concentración de iones  $\text{Cl}^-$  en una muestra dada mediante el uso de una solución de nitrato de plata de una concentración definida. Aunque existen diferentes tipos de argentometría, estos tienen en común la reacción de los iones de plata con los cloruros presentes en la solución acuosa, lo cual produce como resultado cloruro de plata insoluble. Esto se representa mediante la reacción 14 [48].

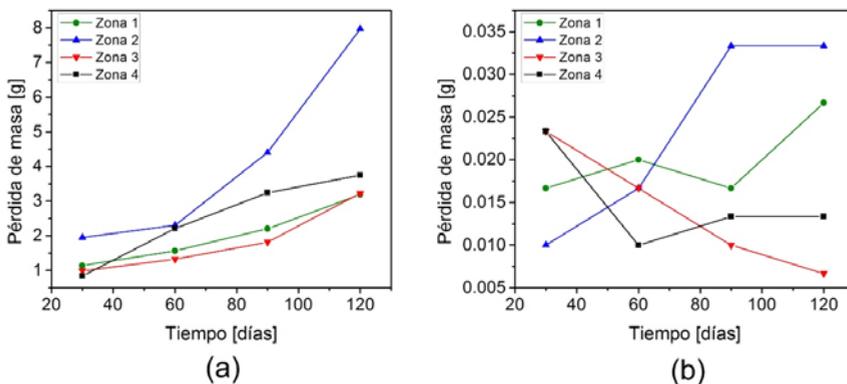


La sal insoluble presente en la solución acuosa es separada después mediante secado u otros procesos de separación sólido-líquido, para la posterior medición de la concentración de iones.

## Resultados y discusión

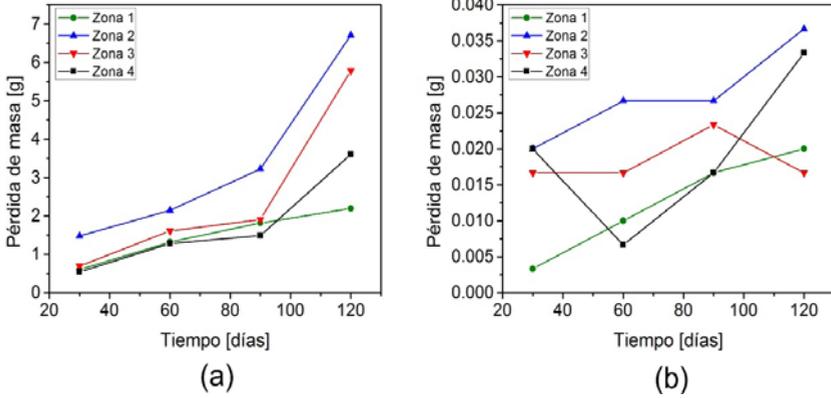
Siguiendo el plan establecido para la recolección de las muestras, se hizo su recolección para posterior limpieza y pesaje. Los datos recolectados por pérdida de masa se ilustran en las Figuras 18 a 20, las cuales muestran la pérdida de peso de los materiales en cada zona estudiada, tanto para el material desnudo (Figura 18a y Figura 19a), como para el material galvanizado (Figura 18b y Figura 19b) y el acero AISI 304 (Figura 20).

**Figura 18.** Pérdida de masa en el acero ASTM A36 (a) desnudo y (b) galvanizado



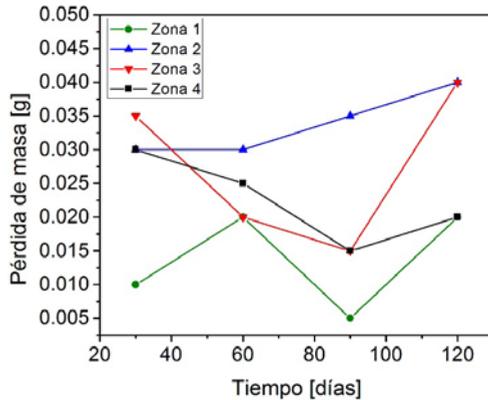
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 19.** Pérdida de masa en el acero ASTM A572 (a) desnudo y (b) galvanizado



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 20.** Pérdida de masa en el acero AISI 304



Fuente: Elaboración propia.

En las gráficas obtenidas, se observa que la pérdida de masa fue mayor en la zona 2 (la universidad), donde la exposición prolongada a los iones cloruro generó pérdidas de masa cercanas a los 8 gramos finalizado el

tiempo de exposición (cuatro meses); en las demás zonas estudiadas, la pérdida de masa, aunque apreciable, fue menor en comparación con la que ocurre en la atmósfera cercana al mar. Un hecho de particular interés sucede con el acero inoxidable (AISI 304): la pérdida de masa obtenida en este caso para cada atmósfera estudiada (como se muestra en la Figura 20 para la zona 2) indica que este material no presentó pérdida significativa de masa a lo largo del periodo de estudio. Por esta razón, no es posible modelar el fenómeno corrosivo para el AISI 304 empleando los resultados obtenidos, pues la pérdida de masa es independiente de los principales factores estudiados (zona geográfica, recubrimiento y tiempo).

### Análisis de varianza y modelos estadísticos

A partir de los resultados obtenidos de manera experimental, se empleó el programa STATGRAPHICS® para determinar la contribución de los factores estudiados en la pérdida de masa, los cuales según el diseño experimental se resumen en:

- *Factor  $X_1$* : tiempo en días.
- *Factor  $X_2$* : tipo de recubrimiento (desnudo o galvanizado).
- De igual manera, se consideraron los efectos de las interacciones entre estos factores, incluyendo:
  - La interacción  $(X_1)^2$ , la cual corresponde al cuadrado del tiempo de exposición.
  - La interacción  $X_1X_2$ , que es el producto del tiempo de exposición y el tipo de recubrimiento.

Estos factores e interacciones se estudiaron para cada material y zona geográfica seleccionada a través de un análisis de varianza, el cual se describió de forma detallada en la sección *Análisis estadístico y caracterización de la corrosión* del capítulo **Metodología experimental**. Como resultado, se obtuvieron los valores P correspondientes a cada factor e interacción, los cuales se muestran en la Tabla 8 para el acero ASTM A36 en la zona 1.

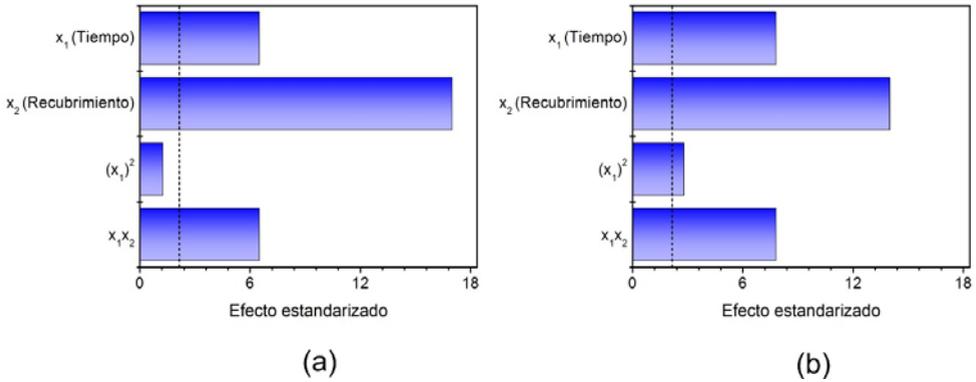
**Tabla 8.** Resultados del análisis de varianza para el acero A36, zona 1

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Razón F	Valor P
X1 (tiempo)	3,4748	1	3,4748	42,57	0
X2 (recubrimiento)	24,1201	1	24,1201	295,46	0
(X1)2	0,123267	1	0,123267	1,51	0,2359
X1X2	3,42056	1	3,42056	41,9	0
Bloques	0,071275	2	0,0356375	0,44	0,6533
Error total	1,38779	17	0,0816348		
Total (corr.)	32,5979	23			
R2	95,7427	R2 ajustado	94,2401		

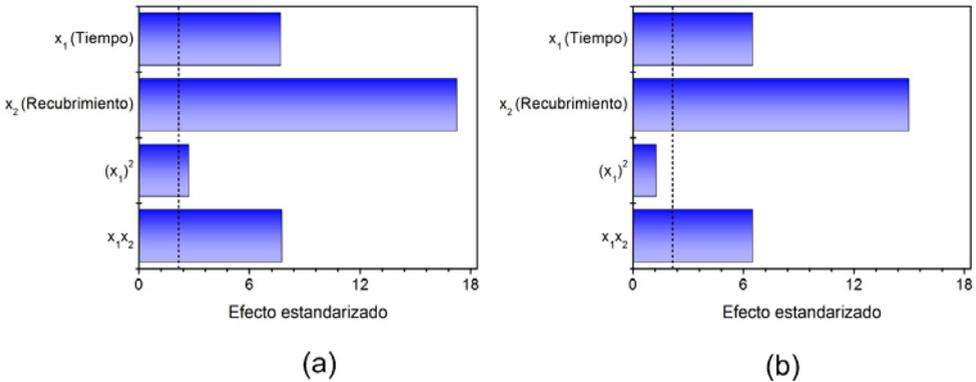
Fuente: Elaboración propia.

A partir de la Tabla 8, se tiene que un factor (o interacción) es estadísticamente significativo en la pérdida de masa cuando el valor P correspondiente es menor de 0,05, bajo una confiabilidad del 95%; este resultado se expresa de forma gráfica en los diagramas de Pareto de las Figuras 21 a 24, en las que el límite que define la relevancia estadística de una variable aparece como una línea a trazos.

Para el acero ASTM A36, los diagramas de Pareto correspondientes a las zonas evaluadas se muestran en las Figuras 21 y 22, en las que se demuestra que, para cada zona estudiada, la influencia de la totalidad de factores estudiados es estadísticamente significativa. No obstante, la interacción (X1)2 –el tiempo al cuadrado– no fue relevante en las zonas 1 ( Figura 21a) y 4 (Figura 22b), lo que llevó a su exclusión en procesos posteriores. Por otra parte, el factor X2 –recubrimiento– se presentó como uno de los factores más influyentes en la pérdida de masa, al mostrar el mayor valor del residuo estandarizado en el análisis de varianza, seguido por la interacción X1X2 y el factor X1.

**Figura 21.** Diagrama de Pareto para ASTM A36, (a) zona 1 y (b) zona 2

Fuente: Elaboración propia.

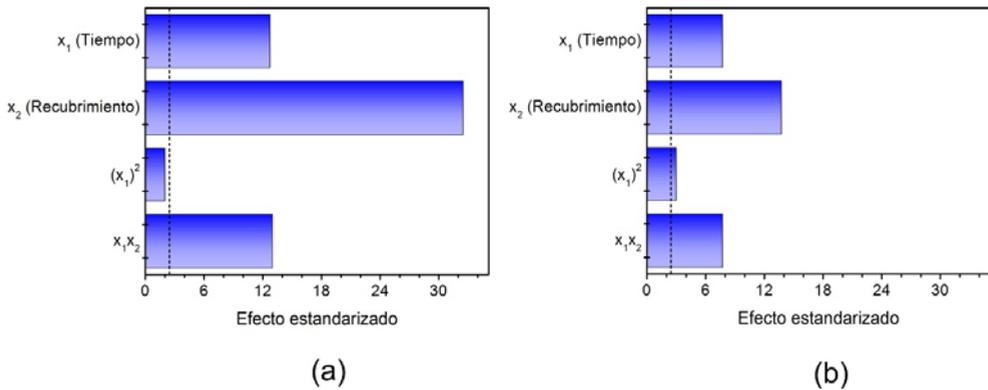
**Figura 22.** Diagrama de Pareto para ASTM A36, (a) zona 3 y (b) zona 4

Fuente: Elaboración propia.

En el acero ASTM A572, la distribución de la influencia de los factores fue más equilibrada que en el caso anterior (como se observa en las Figuras 23 y 24), salvo por un comportamiento inusual del factor B en la zona 1 (Figura 23a), en donde se observó una elevada influencia del recubri-

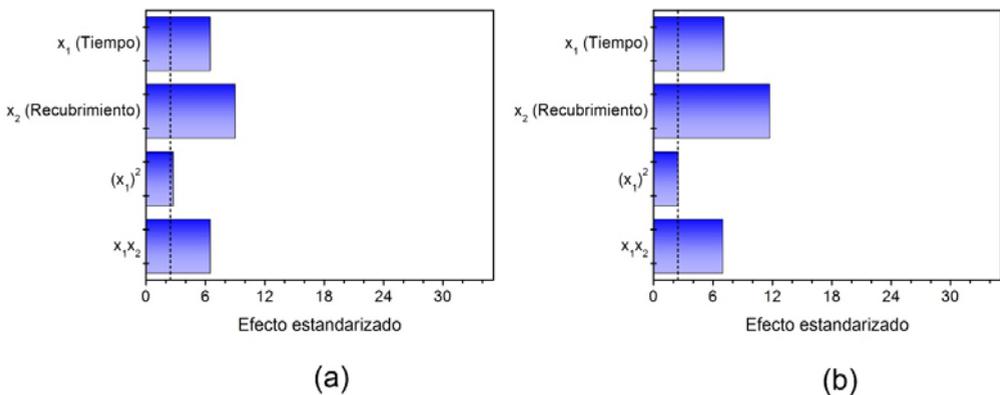
miento sobre la pérdida de masa en esta clase de aceros. De manera similar que en el acero ASTM A36, se encontró que la interacción del tiempo al cuadrado no fue estadísticamente significativa, por lo que se descartó del análisis en dicha zona.

**Figura 23.** Diagrama de Pareto para ASTM A572, (a) zona 1 y (b) zona 2



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 24.** Diagrama de Pareto para ASTM A572, (a) zona 3 y (b) zona 4



Fuente: Elaboración propia.

Además de los valores P, el análisis proporcionó los valores predichos de la respuesta para cada punto de la matriz de diseño. La Tabla 9 muestra estos resultados para el acero ASTM A36 en la zona 1.

**Tabla 9.** Valores predichos de pérdida de masa para el acero A36, zona 1

Medida	Tiempo	Recubrimiento	Pérdida de masa predicha
1	30	-1	1,09717
2	60	-1	1,63183
3	90	-1	2,30983
4	120	-1	3,13117
5	30	1	0,105167
6	60	1	-0,0355
7	90	1	-0,0328333
8	120	1	0,113167
9	30	-1	1,00592
10	60	-1	1,54058
11	90	-1	2,21858
12	120	-1	3,03992
13	30	1	0,0139167
14	60	1	-0,12675
15	90	1	-0,124083
16	120	1	0,0219167
17	30	-1	1,13592
18	60	-1	1,67058
19	90	-1	2,34858
20	120	-1	3,16992
21	30	1	0,143917
22	60	1	0,00325
23	90	1	0,00591667
24	120	1	0,151917

Fuente: Elaboración propia.

Con los valores predichos, se formuló una serie de modelos estadísticos que relacionan la pérdida de masa – la cual es una variable de salida  $y$ – con los factores que influyen en ella; estos modelos presentan la forma general que se muestra en la ecuación 17.

$$y = a + b * x_1 + c * x_2 + d * (x_1)^2 + e * x_1x_2 \quad (17)$$

Donde  $a, b, c, d$  corresponden a los coeficientes de regresión de cada modelo, determinados mediante la aplicación de la ecuación 16. Estos coeficientes se muestran en las Tablas 10 y 11 para los aceros ASTM A36 y A572, respectivamente.

**Tabla 10.** Coeficientes de los modelos estadísticos desarrollados para el ASTM A36

Zona	a	b	c	d	e	R2	% error
1	0,53	-0,0006	-0,158333	0	-0,0112556	95,7427	11,4281
2	1,56542	-0,0331472	0,4425	0,00044583	-0,0334389	95,0206	10,0895
3	0,707083	-0,0105361	-0,00583333	0,00014954	-0,0120833	96,174	13,6763
4	-0,487083	0,0339472	-0,0225	0	-0,0163278	94,8433	12,4155

Fuente: Elaboración propia.

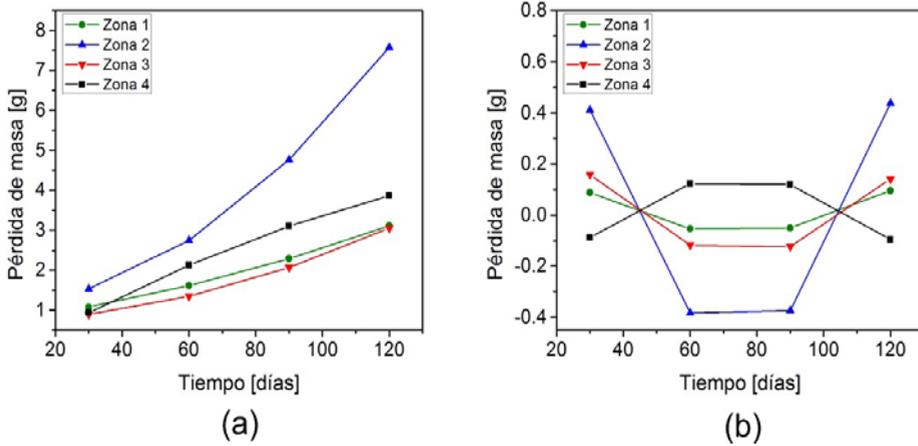
**Tabla 11.** Coeficientes de los modelos estadísticos desarrollados para el ASTM A572

Zona	a	b	c	d	e	R2	% error
1	-0,133333	0,0159944	-0,0808333	0	-0,00872222	98,816	4,2941
2	1,36917	-0,0307167	0,408333	0,00039167	0,0278667	95,058	5,0357
3	1,16125	-0,0356583	0,703333	0,00041065	-0,0259167	91,0693	16,125
4	0,579167	-0,0137222	0,310833	0,0001963	-0,0155556	93,6113	14,8773

Fuente: Elaboración propia.

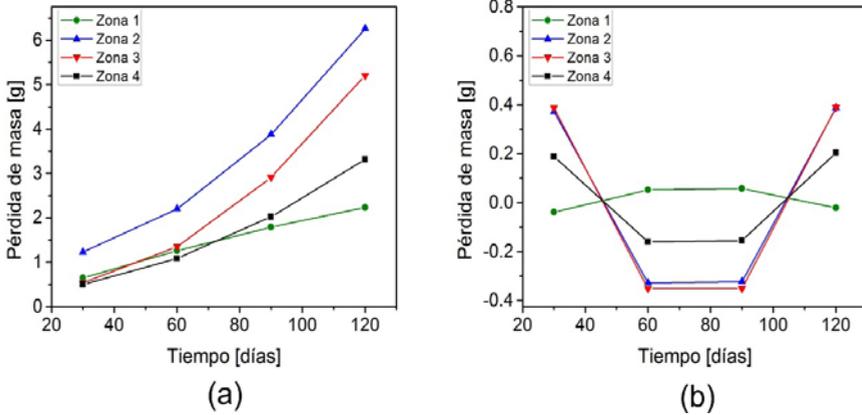
A partir de los coeficientes calculados, se ajustó el modelo teórico correspondiente a cada zona, obteniéndose las gráficas de las Figuras 25 y 26, que muestran la pérdida de masa teórica obtenida en los aceros ASTM A36 y A572.

**Figura 25.** Resultados obtenidos con el modelo teórico para el ASTM A36 (a) desnudo y (b) galvanizado



Fuente: Elaboración propia.

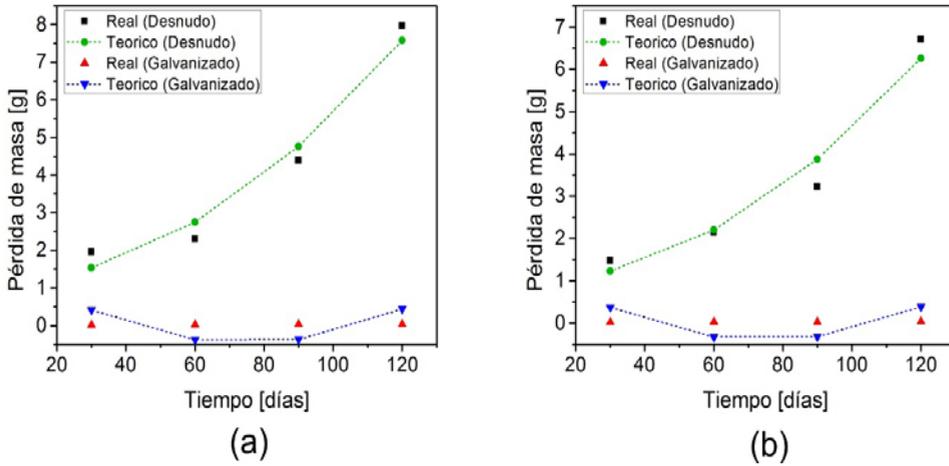
**Figura 26.** Resultados obtenidos con el modelo teórico para el ASTM A572 (a) desnudo y (b) galvanizado



Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en las tablas de los coeficientes de cada modelo, el modelo ajustado se caracterizó por presentar un valor R2 ajustado que oscila entre 90 % y 98 %, lo que indica que los datos teóricos se ajustan de forma considerable a los resultados experimentales; esto se puede comprobar de forma gráfica en la Figura 27, en la que se comparan los resultados obtenidos por los datos experimentales y el modelo para la zona con mayor pérdida de masa, la zona 2.

**Figura 27.** Comparación de los resultados experimentales y el modelo teórico para los aceros (a) ASTM A36 y (b) ASTM A572



Fuente: Elaboración propia.

## Clasificación de las categorías de contaminación

### Tasa de deposición de cloruros y sulfatos.

A partir de las mediciones de iones cloruros y sulfatos en las zonas analizadas durante la investigación, se realizó una clasificación según los lineamientos de la norma ISO 9223:1992 [3]; los resultados se resumen en las Tablas 12 y 13.

**Tabla 12.** Clasificación de cloruros en las atmósferas según la norma ISO 9223:1992

Zona	Tasa de deposición promedio (mg/m <sup>2</sup> día)	Clasificación (según ISO 9223:1992)
2	82,20	S2
4	75,23	S2

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 13.** Clasificación de sulfatos en las atmósferas según la norma ISO 9223:1992

Zona	Tasa de deposición promedio (mg/m <sup>2</sup> día)	Clasificación (según ISO 9223:1992)
2	14,40	P1
4	7,14	P0

Fuente: Elaboración propia.

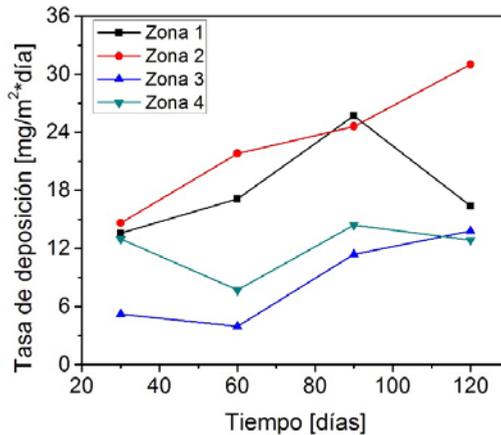
Las clasificaciones anteriores indican lo siguiente:

- S1: Ambientes en donde la tasa promedio de deposición de cloruros es mayor que 3 mg/m<sup>2</sup>día y menor o igual a 60 mg/m<sup>2</sup>día.
- S2: Ambientes en donde la tasa promedio de deposición de cloruros es mayor que 60 mg/m<sup>2</sup>día y menor o igual a 300 mg/m<sup>2</sup>día.
- P0: Ambientes en donde la tasa promedio de deposición de sulfatos es menor o igual a 10 mg/m<sup>2</sup>día.

- *P1*: Ambientes en donde la tasa promedio de deposición de sulfatos es mayor que  $10 \text{ mg/m}^2\text{día}$  y menor o igual que  $35 \text{ mg/m}^2\text{día}$ .

Los ambientes con clasificaciones P0 y S0 son considerados de baja o no muy significativa influencia en la corrosión atmosférica. En la Figura 28 se muestra el comportamiento de las tasas de deposición de sulfatos en cada una de las zonas por cada mes estudiado. Se observó que la zona 2 muestra una tendencia creciente en las tasas de deposición; además, es la zona con mayores concentraciones de sulfatos en el periodo de estudio, seguida por la zona 1 con un comportamiento similar a la anterior, luego la zona 4 y finalmente la zona 3.

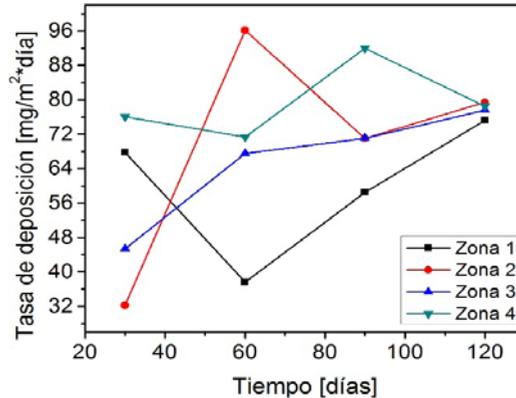
**Figura 28.** Tasa de deposición de sulfatos vs. tiempo para cada zona de estudio



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 29 se observa la tasa de deposición encontrada en los captadores de cloruros a lo largo del estudio para cada ubicación geográfica.

**Figura 29.** Tasa de deposición de cloruros vs tiempo para cada zona de estudio



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 29 se observa que las deposiciones de cloruros, al igual que las deposiciones de sulfatos, son mayores en la zona 2. Esto se esperaba, ya que la pérdida de masa en esta zona es superior que en las demás en cada uno de los materiales estudiados; además, se observa gran variabilidad en el comportamiento de estas deposiciones, lo cual se puede explicar por la intensidad de las lluvias, los cambios en los vientos y la humedad relativa del aire a lo largo del periodo estudiado.

## Humedad relativa y temperatura promedio

Los valores presentados de temperaturas y humedad relativa fueron suministrados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM); estos datos se obtuvieron de estaciones meteorológicas cercanas a los lugares de estudio, tales como las presentes en los municipios de Soledad (útil para la zona 4), Juan de Acosta (necesaria para la zona 3) y el casco urbano de Barranquilla (para las zonas 1 y 2). Los valores suministrados por el IDEAM se encuentran en las Tablas 14 a 16.

**Tabla 14.** Datos de humedad relativa y temperatura promedio (Soledad)

Mes	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	Temperatura anual (°C)	Humedad relativa anual (%)
Abril	27,4	80,2	28	85
Mayo	29,1	82,5	28	85
Junio	28,7	81,5	28	85
Julio	29,1	77,1	28	85
Agosto	28,2	84,1	28	85

Fuente: IDEAM.

**Tabla 15.** Datos de humedad relativa y temperatura promedio (Barranquilla)

Mes	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	Temperatura anual (°C)	Humedad relativa anual (%)
Abril	27,7	84,2	27	83
Mayo	27,6	80,5	27	83
Junio	27,2	77,4	27	83
Julio	27,6	76,8	27	83
Agosto	28,2	71,2	27	83

Fuente: IDEAM.

**Tabla 16.** Datos de humedad relativa y temperatura promedio (Juan de Acosta)

Mes	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	Temperatura anual (°C)	Humedad relativa anual (%)
Abril	29,1	75,3	28,5	78
Mayo	28,3	80,1	28,5	78
Junio	28,4	79,1	28,5	78
Julio	28,7	77,3	28,5	78
Agosto	28,3	80,1	28,5	78

Fuente: IDEAM.

## Tiempo de humectación calculado

De los datos anteriores de humedad relativa y temperaturas promedio, y el anexo B de la norma ISO 9223:1992 “Tiempo de humectación calculado y características climatológicas de las zonas macro climáticas de la tierra” [3], se tiene como resultado un clima cálido húmedo con un tiempo de humectación entre 4200 y 6000 horas al mes (teniendo en cuenta una humedad relativa mayor de 80 % y una temperatura mayor de 0 °C para la formación de la película electrolítica). A su vez, las zonas de estudio se caracterizaron como ambientes tipo 4, ya que las temperaturas promedio mensuales oscilaron entre 27,4 °C y 29,1 °C, con una humedad relativa entre 71,2 % y 84,2 % para el periodo de estudio.

## Clasificación de las zonas de estudio

Con los datos obtenidos de la clasificación por criterios ambientales específicos (iones cloruros, sulfatos y tiempo de humectación), se procedió a definir un código o estándar para cada ambiente estudiado, teniendo en cuenta criterios específicos. Para ello, usando como base las clases establecidas por la normativa ISO 9223:1992 [3] (Tabla 17), se definió el tipo de atmósfera presente en cada ubicación estudiada; los resultados se muestran en la Tabla 18.

**Tabla 17.** Categorías de corrosión atmosférica

Categoría	Corrosividad
C1	Muy baja
C2	Baja
C3	Media
C4	Alta
C5	Muy alta

Fuente: [3].

Con base en los datos analizados, se encontró que en Barranquilla hay una agresividad atmosférica predominantemente media en la mayoría de las zonas de estudio, con una concentración mayor de contaminantes en la zona 2, correspondiente a la Universidad del Atlántico.

**Tabla 18.** Clasificación de las zonas geográficas estudiadas

Zona	Tiempo de humectación	Clasificación de cloruros	Clasificación de sulfatos	Tipo de atmósfera
1		S1	P1	C3
2		S2	P1	C4
3		S1	P0	C3
4		S2	P0	C4

Fuente: Elaboración propia.

## Velocidad de corrosión

Para calcular la velocidad de corrosión se utilizó la ecuación 17, en la cual esta se define como una función de la pérdida de masa, el área de la superficie expuesta al ambiente (en cm<sup>2</sup>) y el tiempo de exposición  $t$  en días [49]:

$$V_{corr} = \frac{\Delta m}{S \cdot t} \quad (18)$$

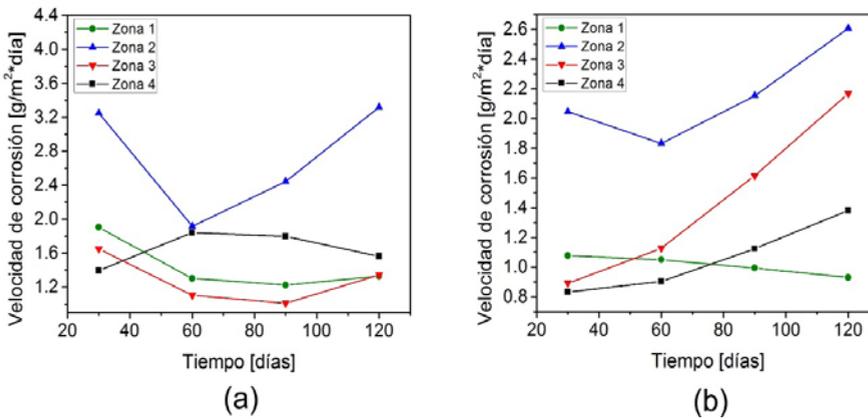
Debido a que la pérdida de masa se modeló a partir de los datos obtenidos en el diseño experimental, se tiene que la velocidad de corrosión es un múltiplo escalar de la misma; reemplazando la ecuación 17 en la ecuación 18, se tiene una expresión general para la velocidad de corrosión de la forma:

$$V_{corr} = \frac{1}{S \cdot t} [a + b \cdot x_1 + c \cdot x_2 + d \cdot (x_1)^2 + e \cdot x_1 x_2] \quad (19)$$

Donde los coeficientes  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $e$  corresponden a los obtenidos para la pérdida de masa y se encuentran en las Tablas 10 y 11.

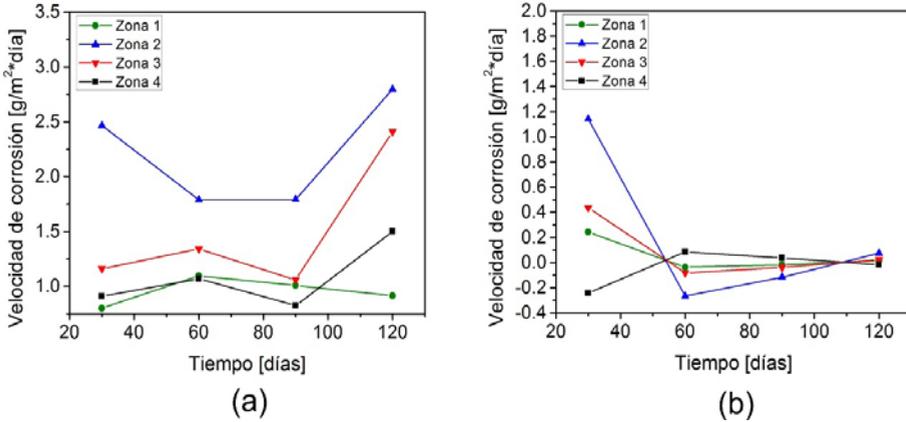
A partir de la ecuación 19, se calculó la velocidad de corrosión (teórica y experimental) para los aceros utilizados en cada zona geográfica, con un área de exposición de 0,02 m<sup>2</sup>. Para el acero ASTM A36, la Figura 30 muestra que la zona 2 tiene una velocidad creciente conforme se avanza a lo largo del periodo de estudio, seguida de la zona 4, mientras que las zonas 1 y 3 tienen una baja velocidad de corrosión y presentan un comportamiento muy similar. Por otra parte, en la Figura 31 se observa que el comportamiento de la corrosión en el acero ASTM A572 muestra una tendencia similar en las zonas geográficas evaluadas, aunque la zona 2 sigue siendo la que tiene mayor velocidad de corrosión.

**Figura 30.** Velocidad de corrosión del ASTM A36 vs. tiempo (a) teórica y (b) experimental en cada zona estudiada



Fuente: Elaboración propia.

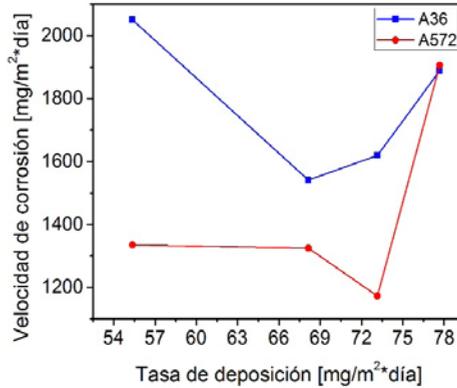
**Figura 31.** Velocidad de corrosión del ASTM A572 vs. tiempo (a) teórica y (b) experimental en cada zona estudiada



Fuente: Elaboración propia.

El comportamiento de la velocidad de corrosión para estos aceros se puede explicar por las altas tasas de deposición de iones cloruros que se encuentran en esta zona, además de la carencia de una capa de pasivación que impida la propagación de la corrosión. Esto se explica bien en la Figura 32, en la cual se relaciona la velocidad de corrosión y la tasa de deposición de iones cloruro. Allí, se observan velocidades de corrosión altas cuando la tasa de deposición de cloruros supera los  $70 \text{ mg/m}^2\cdot\text{día}$ , siendo  $78 \text{ mg/m}^2\cdot\text{día}$  el máximo valor medido de la tasa de deposición.

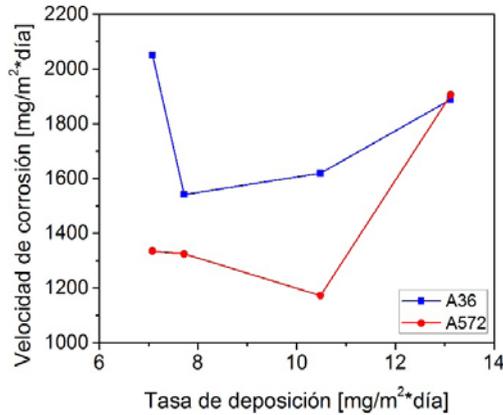
**Figura 32.** Velocidad de corrosión vs. tasa de deposición de cloruros para los aceros ASTM A36 y ASTM A572



Fuente: Elaboración propia.

Con respecto a las tasas de deposición de sulfatos, la Figura 33 hace evidente que las velocidades de corrosión más altas se encuentran a tasas de deposición entre los 13 y 15  $\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{día}$ . En ambos casos, se muestran oscilaciones en el comportamiento de la velocidad de corrosión en función de las tasas de deposición de los agentes contaminantes. Esto puede explicarse en función de otros factores involucrados en el proceso, tales como como la velocidad de los vientos, la frecuencia de lluvias y la posición del sol, entre otros.

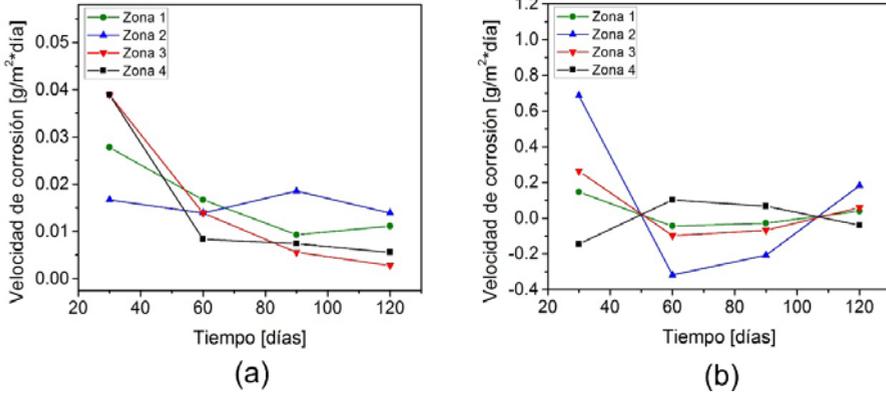
**Figura 33.** Velocidad de corrosión vs. tasa de deposición de sulfatos para los aceros ASTM A36 y ASTM A572



Fuente: Elaboración propia.

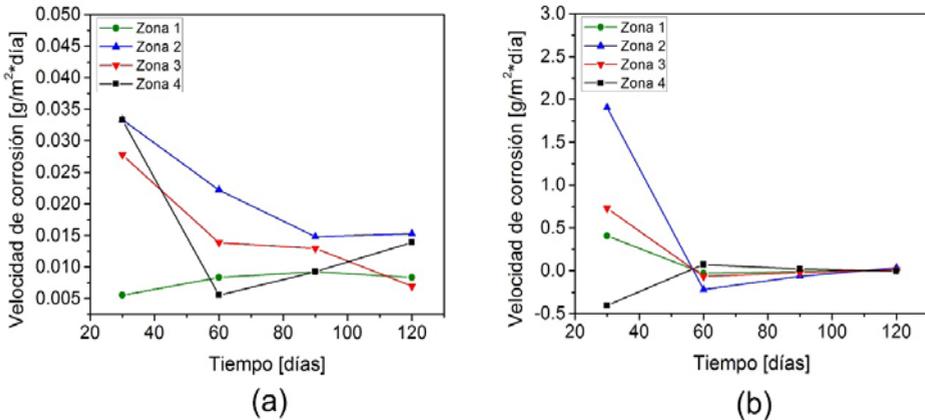
Para los aceros galvanizados e inoxidable AISI 304, las Figuras 34 a 36 expresan de forma gráfica el comportamiento experimental (parte a) y teórico (parte b) de la velocidad de corrosión en función de la zona estudiada. Para el ASTM A36, la Figura 34 muestra una baja variabilidad en la velocidad de corrosión, generada por la capa de galvanizado (zinc) y la resistencia que esta presenta a la corrosión; aun así, se observa que la zona 2 es predominante para el fenómeno. Para el ASTM A572 galvanizado (Figura 35) también se encuentra una baja variabilidad en la velocidad de corrosión, pero la velocidad de corrosión en el material presenta valores más altos que los obtenidos para el acero ASTM A36. Por otra parte, para el acero AISI 304 se observa una baja variabilidad en la velocidad de corrosión (Figura 36) debido a la resistencia a la corrosión del material, ya que el acero inoxidable crea una capa de protección (pasivación) que inhibe la formación de óxidos sobre la superficie. Por esta razón, los efectos de corrosión en este material son bajos, aunque se observa que la zona 2 tiene mayor velocidad de corrosión para este material, al igual que en los casos anteriores.

**Figura 34.** Velocidad de corrosión del ASTM A36 galvanizado vs. tiempo en cada zona estudiada



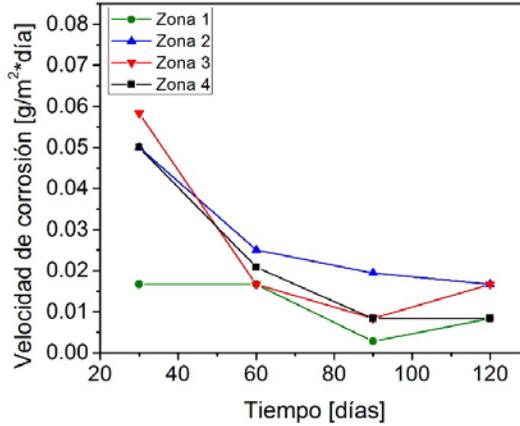
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 35.** Velocidad de corrosión del ASTM A572 galvanizado vs. tiempo en cada zona estudiada



Fuente: Elaboración propia.

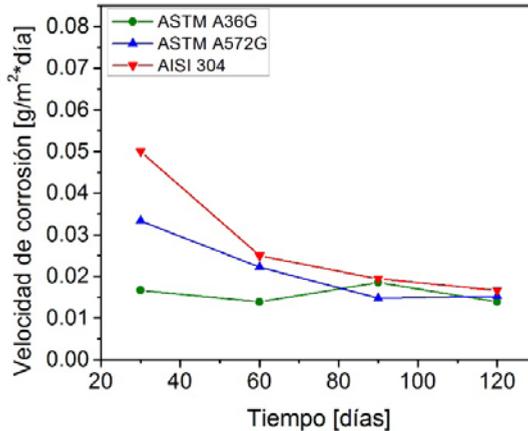
**Figura 36.** Velocidad de corrosión del AISI 304 vs. tiempo en cada zona estudiada



Fuente: Elaboración propia.

Aunque el acero AISI 304 presenta una elevada resistencia a la corrosión debido a su capa de pasivación, se observó que en algunas atmósferas la velocidad de corrosión de este material es mayor que la de los materiales galvanizados (ASTM A36 y A572). Un ejemplo de esto se observa en la Figura 37, en la cual se compara la velocidad de corrosión de estos tres materiales en la atmósfera más agresiva (zona 2). En dicha zona se observa que el AISI 304 experimenta el fenómeno corrosivo a una tasa más elevada en comparación con los aceros galvanizados, siendo el ASTM A36 el material que ofrece mayor resistencia cuando se recubre con una capa superficial de zinc. Esto indica que la elección del AISI 304 y su capa pasivante natural en una zona de dichas características no siempre es la mejor opción; en estos casos, se puede optar por un recubrimiento artificial, que a su vez constituye una solución económica y duradera para la elaboración de estructuras en ciertos ambientes.

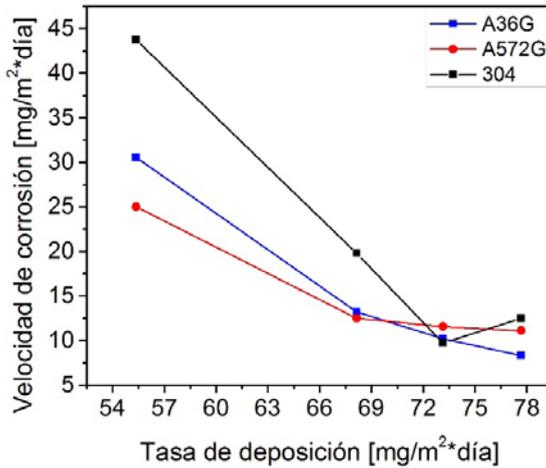
**Figura 37.** Comparación de la velocidad de corrosión del AISI 304 y los aceros galvanizados



Fuente: Elaboración propia.

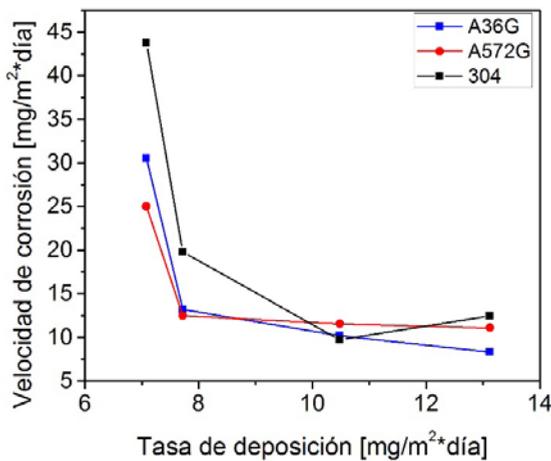
Finalmente, las Figuras 38 y 39 muestran el comportamiento de la velocidad de corrosión para estos tres materiales en función de las tasas de deposición de los agentes contaminantes químicos. Los resultados obtenidos indican que la velocidad de corrosión no aumenta considerablemente a altas tasas de deposición de cloruros, lo que se verificó hasta el valor más alto detectado durante la realización del estudio (70mg/m<sup>2</sup>\*día). De igual manera, la velocidad de corrosión no presenta variaciones significativas conforme se incrementa la deposición de sulfatos hasta el valor límite medido (13 mg/m<sup>2</sup>\*día), aunque su comportamiento es muy oscilante debido a la baja variabilidad de los datos en pérdida de masa, pues la protección que le ofrece la capa de zinc (o la capa pasivante en el AISI 304) minimiza el efecto corrosivo en estos materiales.

**Figura 38.** Velocidad de corrosión vs. tasa de deposición de cloruros para los aceros ASTM A36G, ASTM A572G y AISI 304



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 39.** Velocidad de corrosión vs. tasa de deposición de sulfatos para los aceros ASTM A36G, ASTM A572G y AISI 304



Fuente: Elaboración propia.



## Conclusiones y recomendaciones

Del estudio de campo realizado se concluyó lo siguiente:

Los modelos estadísticos desarrollados como producto de la investigación son capaces de predecir de forma exacta el comportamiento de la corrosión atmosférica para los materiales estudiados en cada una de las ubicaciones geográficas seleccionadas. Se encontró que la pérdida de masa oscila entre 1 y 8 g (aproximadamente un 3,84 % por mes) en los materiales sin recubrimiento, mientras que para los materiales galvanizados (al igual que para el AISI 304), dicha pérdida oscila entre 0,01 y 0,1 g, manteniendo una tendencia similar durante el periodo estudiado. Esta pérdida de masa tiene vital importancia en estructuras de gran tamaño, dado que es proporcional a la cantidad de material expuesto al efecto corrosivo, lo que puede generar pérdidas considerables en este tipo de estructuras (alrededor de 50 kg por mes en una estructura de 1 tonelada). Así, el modelo desarrollado es una herramienta útil para predecir el deterioro de los materiales en Barranquilla y para determinar los costos requeridos en mantenimiento y reemplazo de equipos expuestos a este fenómeno.

Las zonas estudiadas en Barranquilla tienen una agresividad de corrosión atmosférica predominante de categoría 3 (media). Por ello, se considera que la corrosión atmosférica en Barranquilla tiene una relevancia importante. Como las tasas de deposición de cloruros y sulfatos fueron relativamente altas y el clima fue predominantemente húmedo en el pe-

riodo estudiado, se dedujo además que los contaminantes presentes en la atmósfera favorecieron la aparición de la capa electrolítica y, por ende, la oxidación de los materiales ocurrió en tiempos relativamente cortos.

Los materiales con recubrimiento de galvanizado y el acero inoxidable tuvieron una variabilidad de pérdida de masa muy poco significativa debido a que el material tiene alta resistencia a la corrosión y el periodo de evaluación fue muy corto en las zonas de estudio. En consecuencia, el modelo estadístico obtenido para estos materiales no fue muy preciso. Además, la balanza usada presenta una incertidumbre de  $\pm 20$  mg, por lo que los datos con una masa menor a este valor se consideran poco fiables.

Las zonas 1 y 2 – pertenecientes a la Universidad del Atlántico y Puerto Colombia, respectivamente – tuvieron mayor cantidad de agentes contaminantes en el ambiente, por lo que se esperó que la corrosión en estas zonas fuera mucho más significativa en las probetas metálicas, especialmente en la universidad, donde las cantidades de cloruros y sulfatos fueron mucho mayores respecto a las demás zonas (esto puede deberse a su cercanía al mar, a la velocidad del viento, a la polución debido a construcciones cercanas y al tráfico de vehículos). Esto se comprobó en el análisis de iones cloruro y sulfatos; además, fue la zona con mayor pérdida de masa en los materiales estudiados.

Aunque los modelos estadísticos presentan un margen de error con respecto a los datos obtenidos en la medición experimental, se observó que este se mantiene en un rango constante en todas las zonas estudiadas (entre 4 % y 11 %). Esto indicó la existencia de fuentes de variabilidad adicionales a los factores estudiados en el presente trabajo. Debido a las características del proceso corrosivo estudiado (la corrosión atmosférica), una mejor predicción requiere la determinación e inclusión de estas fuentes de variabilidad, lo que abre la posibilidad de futuras investigaciones que complementen los resultados del presente trabajo.

## Referencias

- [1] ASTM G140-02(2014), *Standard Test Method for Determining Atmospheric Chloride Deposition Rate by Wet Candle Method*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2014, [www.astm.org](http://www.astm.org).
- [2] ASTM D2010 / D2010M-98(2017), *Standard Test Methods for Evaluation of Total Sulfation Activity in the Atmosphere by the Lead Dioxide Technique*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017, [www.astm.org](http://www.astm.org).
- [3] ISO 9223:2012. *Corrosion of metals and alloys – Corrosivity of atmospheres – Classification, determination and estimation*. International Organization for Standardization, 2017.
- [4] S. Avner, H. Sidney, L. Larios Aracana y F. Aguilar Bartolome, *Introducción a la metalurgia física*, 2 ed. México: McGraw-Hill, 1977. ISBN 0070024960.
- [5] Universidad Politécnica de Valencia, *Unidad 12. Fundamentos de corrosión y protección* [En línea]. Curso de Fundamentos de Ciencia de Materiales. Disponible en [https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm12/fcm12\\_2.html](https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm12/fcm12_2.html).
- [6] Z. Ahmad, *Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control*, 2 ed. Boston, MA: Elsevier/BH, 2006. ISBN 9780080480336.
- [7] E. Bardal, *Corrosion and Protection*. Springer Science & Business Media, 2004. ISBN 9781852338459.
- [8] Asociación Egresados Universidad Industrial De Santander (ASEDUIS), “Más de 26 mil millones de pesos pierde la industria colombiana debido a la corrosión de materiales, *Universia Colombia*, 2013 [En línea]. Disponible en <https://www.universia.net/co/actualidad/orientacion-aca->

demica/mas-26-mil-millones-pesos-pierde-industria-colombiana-debido-corrosion-materiales-1045848.html

- [9] J. Ávila Medoza y J. Genescá Llongueras, *Más allá de la herrumbre*, 3 ed. Fondo de Cultura Económica, 1986, p. 110. ISBN 9681623967.
- [10] J. W. Spence, F. H. Haynie, F. W. Lipfert, S. D. Cramer y L. G. McDonald, "Atmospheric Corrosion Model for Galvanized Steel Structures", *Corrosion*, vol. 48, no.12, pp. 1009-1019, dic. 1992.
- [11] B. Sanyal y D. V. Bhadwar, "The Corrosion of Metals in Synthetic Atmospheres Containing Sulfur Dioxide", *Journal of Scientific and Industrial Research*, vol. 18, pp. 69-74, feb. 1959.
- [12] J. J. S. Rodríguez, F. J. S. Hernández y J. E. G. GONZÁLEZ. "The effect of environmental and meteorological variables on atmospheric corrosion of carbon steel, copper, zinc and aluminium in a limited geographic zone with different types of environment", *Corrosion Science*, vol. 45, no. 4, pp. 799-815, abr. 2003.
- [13] F. M. D. Rodríguez, "Estudio de la corrosión atmosférica del zinc y el acero galvanizado", tesis doctoral, Universidad de La Laguna, 2001.
- [14] R. Pizarro Cabrera y A. Anaya Pajuelo, "Ensayos para determinación de la corrosión de metales en diferentes ambientes de Lima y Callao", *Revista Peruana de Química e Ingeniería Química*, vol. 2, no. 1, pp. 63-71, 1999.
- [15] S. J. Oh, D. C. Cook y H. E. Townsend, "Atmospheric corrosion of different steels in marine, rural and industrial environments", *Corrosion Science*, vol. 41, no. 9. pp. 1687-1702, ago. 1999.
- [16] Y. Ma, Y. Li y F. Wang, "Corrosion of low carbon steel in atmospheric environments of different chloride content", *Corrosion Science*, vol. 51, no. 5, pp. 997-1006, mayo 2009.
- [17] D. de la Fuente, I. Díaz, J. Simancas, B. Chico y M. Morcillo, "Long-term atmospheric corrosion of mild Steel", *Corrosion Science*, vol. 53, no. 2, pp. 604-617, feb. 2011.
- [18] J. G. Castaño, C. A. Botero, A. H. Restrepo, E. A. Agudelo, E. Correa y F. Echeverría, "Atmospheric corrosion of carbon steel in Colombia", *Corrosion Science*, vol. 52, no. 1, pp. 216-223, ene. 2010.

- [19] “Guía práctica de galvanizado por inmersión en caliente”, Asociación Nacional de Empresarios de Colombia, 2013 [En línea]. Disponible en <http://polyuprotec.com/wp-content/uploads/2017/06/Guia-Galvanizado-por-inmersión-en-caliente.pdf> [Accedido: 02-jul-2017]
- [20] M. Natesan, G. Venkatachari y N. Palaniswamy, “Kinetics of atmospheric corrosion of mild steel, zinc, galvanized iron and aluminium at 10 exposure stations in India”, *Corrosion Science*, vol. 48, no. 11, pp. 3584-3608, nov. 2006.
- [21] F. Corvo, N. Betancourt y A. Mendoza, “The influence of airborne salinity on the atmospheric corrosion of steel”, *Corrosion Science*, vol. 37, no. 12, pp. 1889-1901, dic. 1995.
- [22] T. Kamimura y M. Stratmann, “Influence of chromium on the atmospheric corrosion of steel”, *Corrosion Science*, vol. 43, no. 3, pp. 429-447, marzo 2001.
- [23] A. R. Mendoza y F. Corvo, “Outdoor and indoor atmospheric corrosion of carbon steel”, *Corrosion Science*, vol. 41, no. 1, pp. 75-86, ene. 1999.
- [24] H. E. Townsend. “Effects of Alloying Elements on the Corrosion of Steel in Industrial Atmospheres”, *Corrosion*, vol. 57, no. 6, pp. 497-501, junio 2001.
- [25] M. Echeverría Boán, C. A. Echeverría Lage, M. Boán Cepero, C. A. Echeverría Boán, S. Benavides García, M. Petersson Roldán y S. M. Betancourt Miguel, “Determinación de iones cloruro y sulfato en un mismo captador en investigaciones de corrosión atmosférica”, *Revista CENIC. Ciencias Químicas*, vol. 40, no. 1, p. 11-16, ago. 2009.
- [26] M. Echeverría Boán, M. Boán Cepero y S. M. Betancourt Miguel. Esclarecimiento de los niveles de deposición de cloruros y sulfatos por diferentes métodos de captación establecidos internacionalmente en la Universidad de Matanzas. Matanzas, Cuba, 2005.
- [27] P. A. Schweitzer, *Fundamentals of Metallic Corrosion: Atmospheric and Media Corrosion of Metals*. CRC Press, 2007, p. 727. ISBN 0849382432.
- [28] P. M. González Sánchez. “Estudio de la modelación matemática de la corrosión atmosférica del cobre en la provincia de Las Palmas: caracterización de la velocidad de corrosión mediante técnicas electroquímicas”, tesis doctoral, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 2010.

- [29] K. Bartoň, S. Bartoňová y E. Beránek, "Die Kinetik des Rostens von Eisen in der Atmosphäre", *Materials and Corrosion*, vol. 25, no. 9, pp. 659-663, ago. 2018.
- [30] G. Schikorr, "Über den Mechanismus des atmosphärischen Rostens des Eisens", *Materials and Corrosion*, vol. 14, no. 2, pp. 69-80, ago. 1963
- [31] W. H. J. Vernon, "Second experimental report to the Atmospheric Corrosion Research Committee (British Non-Ferrous Metals Research Association)", *Transactions of the Faraday Society*, vol. 23, no. 0, pp. 113-183, 1927.
- [32] R. Preston y B. Sanyal, "Atmospheric Corrosion by Nuclei", *Journal of Applied Chemistry*, vol. 6, no. 1, pp. 26-44, ago. 1956.
- [33] J. Cegarra Sánchez, *Metodología de la investigación científica y tecnológica*. Ediciones Díaz de Santos, 2004, p. 355. ISBN 9788479786243.
- [34] R. Hernández, C. Fernández y M. Baptista, *Metodología de la investigación*, 5 ed. México D.F.: McGraw-Hill, 2010, p. 656. ISBN 978-607-15-0291-9.
- [35] D. C. Montgomery, *Diseño y análisis de experimentos*. México, D.F.: Limusa, 2014. ISBN 978-968-18-6156-8.
- [36] H. Gutiérrez Pulido y R. de la Vara, *Análisis y diseño de experimentos*. México D.F.: McGraw-Hill, 2004, p. 571. ISBN 9701065263.
- [37] *ASTM G50-76(2003), Standard Practice for Conducting Atmospheric Corrosion Tests on Metals*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 1976, [www.astm.org](http://www.astm.org).
- [38] *ASTM A36 / A36M-14, Standard Specification for Carbon Structural Steel*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2014, [www.astm.org](http://www.astm.org).
- [39] *ASTM A572 / A572M-18, Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Columbium-Vanadium Structural Steel*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2018, [www.astm.org](http://www.astm.org).
- [40] *ASTM A276 / A276M-17, Standard Specification for Stainless Steel Bars and Shapes*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017, [www.astm.org](http://www.astm.org).

- [41] *ASTM G1-03(2017)e1, Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017, [www.astm.org](http://www.astm.org).
- [42] *ISO 9225:2012. Corrosion of metals and alloys – Corrosivity of atmospheres – Measurement of environmental parameters affecting corrosivity of atmospheres*. International Organization for Standardization, 2017.
- [43] *ASTM G91-11(2018), Standard Practice for Monitoring Atmospheric SO2 Deposition Rate for Atmospheric Corrosivity Evaluation*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2018, [www.astm.org](http://www.astm.org).
- [44] OHAUS | Pioneer® Plus Precision Electronic Balance, PA3202 [En línea]. Disponible en <https://kr.ohaus.com/es-MX/Products/Balances-Scales/Precision-Balances/Pioneer-Plus-Precision/Electronic-Balance-PA3202>. [Accedido: 02-sep-2018]
- [45] “Espectrometría de fluorescencia de rayos X” [En línea]. Disponible en <https://www2.uned.es/cristamine/mineral/metodos/xrfs.htm>. [Accedido: 08-abril-2018]
- [46] “S2 PICOFOX - Technical Details, TXRF Spectrometer for Trace Analysis - S2 PICOFOX, Bruker [En línea]. Disponible en <https://www.bruker.com/products/x-ray-diffraction-and-elemental-analysis/micro-xrf-and-txrf/s2-picofox/technical-details.html>
- [47] *ASTM D512-12, Standard Test Methods for Chloride Ion In Water*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2012, [www.astm.org](http://www.astm.org).
- [48] F. Corvo, J. Minotas, J. Delgado y C. Arroyave, “Changes in Atmospheric Corrosion Rate Caused by Chloride Ions Depending on Rain Regime”, *Corrosion Science*, vol. 47, no. 4, pp. 883-892, abr. 2005.
- [49] *ASTM G92-86(2015), Standard Practice for Characterization of Atmospheric Test Sites*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2015, [www.astm.org](http://www.astm.org).

## Los autores



**Cristian Antonio Pedraza Yepes.** Nació en Barranquilla, Atlántico, Colombia, en 1975. Recibió su título en Ingeniería Mecánica de la Universidad del Atlántico en 2001. Se graduó como Máster en Ingeniería Mecánica de la Universidad del Norte en 2011. Actualmente trabaja como Profesor Asociado y es miembro del Grupo de Investigación CONFORMAT del Programa de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Atlántico. Sus áreas de interés en investigación incluyen el diseño mecánico, los procesos de fabricación, la caracterización de materiales y la generación de energía alternativa.



**Oscar Fabian Higuera Cobos.** Nació en Bucaramanga, Santander, Colombia, en 1976. Es egresado de la Universidad Industrial de Santander, en donde obtuvo los títulos de Ingeniero Metalúrgico en el año 2000 y de M. Sc. en Ingeniería Metalúrgica en el año 2004. Obtuvo un Ph. D. en Ciencia e Ingeniería de los Materiales de la Universidad Politécnica de Cataluña, España, en el año 2013. Desde el 2001 y durante sus estudios de maestría trabajó como profesor en la Universidad Industrial de Santander. Posteriormente, trabajó como profesor de planta en la Universidad Tecnológica de Pereira entre 2005 y 2015. Actualmente, es Profesor Asociado y director del Grupo de Investigación CONFORMAT del Programa de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Atlántico. Es autor de dos libros relacionados con las áreas de materiales y

tribología, así como de diferentes artículos relacionados con la Ingeniería Metalúrgica y la Ciencia de los Materiales. Sus principales áreas de investigación están relacionadas con la deformación plástica severa, la electroquímica y el medio ambiente, la metalurgia física, los tratamientos térmicos y los materiales avanzados.



**Mónica Johanna Monsalve Arias.** Nació en Medellín, Antioquia, Colombia. Es egresada de la Universidad de Antioquia, donde obtuvo los títulos de Ingeniera de Materiales en 2005, Magíster en Ingeniería en 2008 y Doctora en Ingeniería en 2014. Obtuvo el título de Doctora en *Matériaux Céramiques et Traitements de Surfaces* de la Université de Limoges, Francia, en 2014. Se desempeñó como profesora de cátedra en la Universidad de Antioquia entre 2013 y 2015, y como docente de planta en la Universidad del Atlántico entre 2015 y 2018. Desde el 2018 hasta la fecha, ha estado vinculada como profesora de planta en el programa de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica de la Universidad Nacional de Colombia y es integrante del Grupo de Investigación AFIS (análisis de fallas, integridad y superficies). Ha realizado proyectos de investigación en el área de materiales cerámicos, recubrimientos cerámicos, biocerámicos y esfuerzos residuales. Sus campos de interés en trabajo e investigación incluyen los materiales cerámicos, los recubrimientos depositados mediante proyección térmica y PVD, los biocerámicos y los esfuerzos residuales.



**José Luis Cano Gómez.** Nació en Barranquilla, Atlántico, Colombia, en 1992. Recibió el título de Ingeniero Mecánico de la Universidad del Atlántico en 2019. Entre 2017 y principios de 2019, se desempeñó como Ingeniero de Laboratorio en la industria del petróleo y gas, liderando procesos productivos y de calidad con certificación API e ISO. Actualmente se desempeña en el montaje de plantas procesadoras de productos cárnicos.



**Hebert Alejandro Gutiérrez Peña.** Nació en Barranquilla, Atlántico, Colombia, en 1993. Recibió el título de Ingeniero Mecánico de la Universidad del Atlántico en 2019. En ese mismo año, se desempeñó como instrumentista industrial en el sector de la metrología, la cual hace parte de sus áreas de interés, además del mantenimiento.