



**Estudio de la corrosión atmosférica del cobre en la ciudad de Cartagena de indias  
durante el primer año de exposición**

Cristhian Smith Matos Castañeda  
Diego Alexander González Santamaria

Universidad Antonio Nariño  
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica  
Bogotá, Colombia  
2024



**Estudio de la corrosión atmosférica del cobre en la ciudad de Cartagena de indias  
durante el primer año de exposición**

Cristhian Smith Matos Castañeda  
Diego Alexander González Santamaria

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:  
**Ingeniero Electromecánico**

**Director**

PhD. John Ríos Rojas

**Deterioro de materiales**

Grupo de Research in Energy and materials (REM)

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Bogotá DC, Colombia

2024

## Contenido

|  |           |
|--|-----------|
| <i>Figuras</i>   | 6         |
| <i>Tablas</i>  | 7         |
| <i>Ilustraciones</i>   | 8         |
| <i>Resumen</i>   | 9         |
| <i>Abstract</i>  | 10        |
| <i>Introducción</i>  | 11        |
| <b>1 Capítulo</b>  | <b>13</b> |
| 1.1 <i>Descripción del problema</i>  | 13        |
| 1.2 <i>Justificación</i>   | 14        |
| 1.3 <i>Objetivos</i>   | 15        |
| 1.3.1 <i>Objetivo general</i>  | 15        |
| 1.3.2 <i>Objetivos específicos</i>   | 15        |
| 1.4 <i>Alcance</i>   | 16        |
| <b>2 Capítulo Marco Teórico</b>  | <b>17</b> |
| 2.1 <i>Ubicación de Cartagena de Indias</i>                                    | 17        |
| 2.2 <i>Agentes contaminantes de la ciudad de Cartagena de Indias</i>           | 17        |
| 2.2.1 <i>Categorización de contaminantes</i>                                   | 18        |
| 2.3 <i>Datos meteorológicos de la ciudad de Cartagena de Indias</i>            | 19        |
| 2.3.1 <i>Calificación de corrosión en la atmosfera</i>                         | 19        |
| 2.4 <i>Distribución de corrosividad por medición de velocidad de corrosión</i> | 20        |
| 2.5 <i>Informe de niveles de contaminación según resolución 2254/2017.</i>     | 20        |
| 2.6 <i>Descripción general de los agentes contaminantes</i>                    | 21        |
| 2.7 <i>Generalidades del cobre</i>   | 22        |
| 2.7.1 <i>Propiedades químicas del cobre</i>                                    | 22        |
| 2.7.2 <i>Características del cobre</i>   | 22        |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 2.8   | <i>Categoría de corrosividad de la atmósfera.</i>                                     | 22 |
| 2.8.1 | <i>Norma ISO 9223:2012</i>  | 23 |
| 2.8.2 | <i>Funciones dosis-respuesta</i>  | 23 |
| 2.9   | <i>Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS)</i>                              | 24 |
| 2.10  | <i>Celda electroquímica</i>   | 24 |
| 2.11  | <i>Aspectos de las mediciones Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS)</i>   | 24 |
| 2.12  | <i>Ajustes de datos por medio Circuito equivalente</i>                                | 27 |
| 2.13  | <i>Resistencia</i>  | 27 |
| 2.14  | <i>Capacitancia</i>   | 27 |
| 2.15  | <i>Inductancia L</i>  | 27 |
| 2.16  | <i>Elemento constante CPE</i>   | 28 |
| 2.17  | <i>Resistencia solución (Rs)</i>  | 28 |
| 2.18  | <i>Resistencia de polarización</i>  | 28 |
| 2.19  | <i>Capacitancia de doble capa, Cdl</i>  | 29 |
| 2.20  | <i>Pseudo capacitancia o elemento de fase constante</i>                               | 29 |
| 2.21  | <i>Circuito eléctrico equivalente para ajuste EIS.</i>                                | 29 |
| 2.22  | <i>Microscopía Electrónica de Barrido SEM</i>   | 30 |
| 2.23  | <i>Análisis en el procedimiento espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS)</i> | 32 |
| 2.24  | <i>Amplitud (Onda sinusoidal)</i>   | 32 |
| 2.25  | <i>Tiempo de integración</i>  | 32 |
| 2.26  | <i>Rango de frecuencia</i>  | 33 |
| 2.27  | <i>Curva de polarización Tafel</i>  | 33 |
| 3     | <i>Capítulo Metodología</i>   | 35 |
| 3.1   | <i>Exposición de las muestras estándar y datos ambientales</i>                        | 35 |

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 3.2 | <i>Composición y análisis químico de la muestra.</i>   | 36 |
| 3.3 | <i>Velocidad de corrosión norma ISO 9223</i>   | 36 |
| 3.4 | <i>Impedancia electroquímica (EIS)</i>   | 36 |
| 3.5 | <i>Simulación de impedancia</i>  | 37 |
| 3.6 | <i>Microscopía electrónica de barrido (SEM)</i>  | 37 |
| 4   | <i>Capítulo</i>  | 38 |
| 4.1 | <i>Velocidad de corrosión del cobre en la ciudad de Cartagena de Indias</i>  | 38 |
| 4.2 | <i>Morfología del producto de corrosión formado en la superficie del cobre.</i>  | 41 |
| 4.3 | <i>Comportamiento del cobre evaluado por Espectroscopía de impedancia EIS43</i>  |    |
| 4.4 | <i>Velocidad de corrosión instantánea del cobre a partir de curvas Tafel</i>   | 46 |
| 4.5 | <i>Análisis de la impedancia electroquímica mediante circuito equivalente</i>  | 47 |
| 4.6 | <i>Comportamiento electroquímico del cobre en la atmósfera de Cartagena en relación con los parámetros ambientales de la ciudad y la velocidad de corrosión.</i> | 48 |
| 4.7 | <i>Pérdida de material hasta 10 años de exposición estimada mediante uso de función dosis respuesta</i>  | 49 |
| 5   | <i>Conclusiones</i>  | 51 |
| 6   | <i>Referencias</i>   | 53 |

## Figuras

|  |    |
|--|----|
| <i>Figura 1. Modulación de potencial y corriente registrada durante una medición de impedancia [20].....</i>                 | 25 |
| <i>figura 2 .Diagrama de Nyquis [21] .....</i>   | 25 |
| <i>figura 3 Variación de diagrama con elementos circuito equivalente [21].....</i>   | 26 |
| <i>figura 4 Gráfica Bode. Curva roja punteada (fase vs frecuencia), curva azul punteada (modulo vs frecuencia) [20].....</i> | 26 |
| <i>figura 5 Modelo de circuito equivalente [26].....</i>   | 30 |
| <i>figura 6 Grafica onda sinusoidal.....</i>   | 32 |
| <i>figura 7 Representación de curva Tafel [4].....</i>   | 33 |
| <i>figura 8 Curva de polarización tafel para agua salina [30] .....</i>  | 34 |
| <i>figura 9 Temperatura promedio 2016 Cartagena [15] .....</i>   | 39 |
| <i>figura 10 precipitación en mm promedio [15] .....</i>   | 40 |
| <i>figura 11 Humedad relativa en Cartagena [15].....</i>   | 40 |
| <i>figura 12 Velocidad de corrosión de función dosis respuesta.....</i>  | 40 |
| <i>figura 13 Imagen SEM de placa expuesta 1 año UAN y Mayor.....</i>   | 41 |
| <i>figura 14 Diagrama de bode de impedancia electroquímica de la Universidad Mayor y UAN [32] .....</i>                      | 43 |
| <i>figura 15 Diagrama de fase de impedancia electroquímica de la Universidad Mayor y UAN.....</i>                            | 44 |
| <i>figura 16 Diagrama de Nyquist Mayor.....</i>  | 45 |
| <i>figura 17 Diagrama de Nyquist de UAN [32] .....</i>   | 45 |
| <i>figura 18 Curva de polarización de Mayor y UAN [32] .....</i>   | 46 |
| <i>figura 19 Velocidad de corrosión instantánea del cobre durante 1 año de exposición. Fuente: Datos propios .....</i>       | 47 |
| <i>figura 20 pérdida de masa g.m<sup>2</sup> respecto al tiempo en años. ....</i>  | 49 |

### Tablas

|  |    |
|--|----|
| <i>Tabla 1 Categorización por contaminación de sustancias que incluye azufre mediante SO<sub>2</sub></i> .....                           | 18 |
| <i>Tabla 2 Categorías de corrosión en la atmósfera [14]</i> .....  | 20 |
| <i>Tabla 3 Velocidad de corrosión (rcorr) en un año de exposición del cobre para las múltiples categorías de corrosividad [14]</i> ..... | 20 |
| <i>Tabla 4 Niveles máximos permisibles criterio en el aire [16]</i> .....  | 21 |
| <i>Tabla 5 Categorías de corrosividad de la atmósfera [14]</i> .....   | 22 |
| <i>Tabla 6 Elementos comunes de circuitos equivalente [23]</i> .....   | 27 |
| <i>Tabla 7 Contaminantes y datos meteorológicos promedio anual sujeto a función dosis-respuesta</i> .....                                | 38 |
| <i>Tabla 8 Cloruros en muestras expuestas</i> .....  | 39 |
| <i>Tabla 9 valores de capacitancia y resistencia de simulación de circuito equivalente [32]</i> .....                                    | 47 |

**Ilustraciones**

|   |           |
|---|-----------|
| <i>Ilustración 1 Mapa de Cartagena de Indias [12].....</i>    | <i>17</i> |
| <i>Ilustración 3 Imágenes de pruebas SEM .....</i>            | <i>31</i> |
| <i>Ilustración 2 Sitios de exposición de placas [12].....</i> | <i>35</i> |

## Resumen

Este estudio evalúa la velocidad de corrosión del cobre en la ciudad de Cartagena de indias en el primer año de exposición. Muestras del material fueron expuestas en 2 sitios de la ciudad, Universidad Antonio Nariño y Universidad mayor de Cartagena (UAN y Mayor), se determinó la velocidad de corrosión por el método de pérdida de masa y función dosis respuesta, y se realizó una evaluación posterior del material por medio de impedancia electroquímica, curvas de polarización y microscopía electrónica de barrido.

Los resultados determinan que la atmosfera en la ciudad es altamente corrosiva llegando a una categorización C4/C5 con una velocidad de corrosión de  $2,7 \mu\text{m/año}$  y  $3,1 \mu\text{m/año}$  luego de un año de exposición, presentando un valor casi constante a partir de los 6 meses. En adición se evidencio un comportamiento capacitivo del cobre al ser expuesto en la ciudad, el cual se ve relacionando directamente por la ubicación de la placa. En el sitio Mayor se tiene una mayor corrosión del cobre debido a que se encuentra ubicada en la zona costera; por su parte en el sitio UAN el cual presenta un comportamiento a la corrosión ligeramente mejor por estar ubicado dentro de la parte urbana donde la condición de la atmosfera es menos agresiva. Esta información de la corrosión del cobre en un ambiente tropical costero es bastante útil ya que la ciudad cuenta con un complejo industrial importante y con gran patrimonio histórico y cultural, permite ser empleado al momento de generar programas de mantenimiento o conservación.

***Palabras clave:* Velocidad de corrosión, espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS), electroquímica, circuito eléctrico equivalente.**

### **Abstract**

This investigation evaluates the rate of copper corrosion in the city of Cartagena de Indias in the first year of exposure. Samples of the material were exposed in 2 sites of the city, Universidad Antonio Nariño and Universidad Mayor de Cartagena (UAN and Mayor), the corrosion rate was determined by the method of mass loss and dose-response function, and a subsequent evaluation of the material was carried out by means of electrochemical impedance. polarization curves and scanning electron microscopy.

The results determine that the atmosphere in the city is highly corrosive, reaching a C4/C5 categorization with a corrosion rate of 2.7  $\mu\text{m}/\text{year}$  and 3; 1  $\mu\text{m}/\text{year}$  after one year of exposure, presenting an almost constant value from 6 months onwards. In addition, a capacitive behavior of copper when exposed in the city was evidenced, which is directly related by the location of the metal. At the Mayor site, there is greater corrosion of copper due to the fact that it is located in the coastal zone; On the other hand, in the UAN site, which presents a slightly better corrosion behavior because it is located within the urban zone where the condition of the atmosphere is less aggressive. This information on copper corrosion in a tropical coastal environment is quite useful since the city has an important industrial complex and great historical and cultural heritage, which allows it to be used when generating maintenance or conservation programs.

***Keywords:* Corrosion rate, Electrochemical impedance spectroscopy (EIS), Scanning electron microscopy (SEM), Electrochemistry, Equivalent electrical circuit.**

## Introducción

La oxidación en la atmósfera de metales ocurre a través de un proceso electroquímico, en el cual el electrolito consiste en una delgada capa de humedad o una película acuosa cuando el metal está visiblemente mojado. Esta condición húmeda favorece la reacción química que resulta en la corrosión del metal. [1]

En presencia de una película de electrolito, la mayoría de los metales expuestos en la atmósfera experimentan corrosión a través del proceso catódico de reducción de oxígeno. Solo en casos de alta contaminación por productos ácidos, cobra importancia la reacción de descarga de iones hidrógeno. El proceso de corrosión atmosférica es la combinación de procesos parciales que ocurren cada vez que se forma la capa de electrolito sobre el metal. Las precipitaciones acuosas y la condensación de humedad debido a cambios de temperatura son los principales impulsores de la corrosión en la atmósfera. [1]

El proceso de corrosión tiene lugar cuando la superficie se encuentra humedecida debido a diferentes fenómenos meteorológicos como la lluvia, condensación de humedad (rocío), niebla, etc. El tiempo durante el cual permanece humedecida la superficie metálica, conocido como tiempo de humectación (TDH), es, por tanto, un factor determinante de la velocidad de corrosión atmosférica. Un indicador frecuentemente utilizado para estimar el TDH es calcular el tiempo anual acumulado durante el cual se cumplen simultáneamente las condiciones de humedad relativa ( $HR > 80\%$ ) y temperatura ( $T > 0^\circ \text{C}$ ). [2]

Por otro lado, la presencia de contaminantes atmosféricos incrementa considerablemente la velocidad de corrosión. El cloruro de sodio ( $\text{NaCl}$ ) y el óxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), son los agentes corrosivos más comunes de la atmósfera. Se ha documentado en la bibliografía una variedad de investigaciones que vinculan las velocidades de corrosión con la salinidad atmosférica y el dióxido de azufre [3]. La Influencia de la contaminación en ciudades como Cuzco, Perú genera que la velocidad de corrosión del cobre aumente al estar contaminada la atmósfera por cantidades importantes de  $\text{SO}_2$ . [4]

La espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) es una técnica crucial para comprender el impacto de la corrosión en un material, aunque no es la única. Esta técnica permite determinar la capacidad del material para resistir la corrosión aplicando valores de potencial a distintas frecuencias en un momento dado, lo que facilita la creación de un modelo de circuito equivalente para extraer parámetros relevantes. [5]

Otra técnica efectiva al momento de analizar el comportamiento de la corrosión en un material es la microscopía electrónica de barrido (SEM), ya que permite obtener una imagen de la superficie del material logrando observar las características superficiales del material, para tener una imagen de la morfología del producto de corrosión formado. [6]

Por medio de esta investigación, se quiere aportar al estudio de los efectos de la corrosión causados por la exposición atmosférica para la aplicación industrial, ingeniería y estructuras. Para ello se pretende aplicar las bases de técnicas de caracterización de materiales, es el caso de técnicas electroquímicas, microscopía electrónica de barrido, y procedimientos de evaluación de la velocidad de corrosión de metales. Es importante destacar que un gran porcentaje de la contaminación atmosférica se debe a la emisión de sustancias particuladas que pueden causar directamente daños a los materiales como el cobre cuando están en ambiente sin recubrimiento, lo que aumenta el riesgo de deterioro y pérdida de propiedades del material, ya sean industriales, de ingeniería o de edificaciones. Estas emisiones, que son notablemente perceptibles, reducen la calidad del cobre y sus propiedades de uso industrial.

Generalmente las diversas modalidades que afectan a la contaminación atmosférica se deben al desarrollo y diferentes procesos industriales, por ejemplo, las industrias de plásticos, como también el monóxido y dióxido de carbono, azufre, óxidos de nitrógeno entre otros agentes contaminantes y climatológicos. De manera global se ha visto reflejado que la pérdida de metales siendo por materia de corrosión se debe a estas condiciones y cambios climatológicos que han variado durante las últimas décadas y afectando el entorno ambiental.

# 1 Capítulo

## 1.1 Descripción del problema

El cobre con un color naranja rojizo es el quinto metal más habitual en la corteza terrestre [7], es bastante útil de forma pura o aleatoria es por ello por lo que sus aleaciones son ampliamente utilizadas en las industrias debido a algunas propiedades favorables tales como buena resistencia a la corrosión, alta electricidad y conductividad térmica, trabajabilidad mecánica y maleabilidad [8]

Cabe resaltar que dentro de las propiedades físicas del cobre es un buen material para la conducción de calor y presenta mayor resistencia a la corrosión que otros materiales metálicos, es el caso de algunos aceros; no obstante, se evidencia que en el transcurso del tiempo los cambios y condiciones abruptos del clima, como precipitaciones, lluvia, nieve o niebla y condensación de humedad debido a cambios de temperatura, atacan directamente al material por más propiedades resistentes de la misma, basándose en la base experimental durante los efectos de la corrosión del cobre. [9]

Esta necesidad evidente subraya el interés en la investigación, planteando las preguntas: ¿Cuál es el comportamiento de la corrosión del cobre expuesto a la intemperie en la ciudad de Cartagena de Indias durante el primer año? y ¿Qué ventaja económica aportarían las primeras pruebas directas realizadas a nivel industrial, de ingeniería y en la ciudad de Cartagena? [10]

Se pretende aportar como método investigativo, por medio de pruebas implementadas al material de Cobre que fue expuesto en dos lugares distintos debido a la humedad y salinidad que presenta en el ambiente en zonas cercanas a la costa y aledañas a la ciudad de Cartagena de Indias. [10]

## 1.2 Justificación

Durante las últimas décadas se ha demostrado un gran avance a nivel industrial e ingeniería estructural, donde cabe resaltar la gran importancia del material como es el Cobre, ya que por sus características mecánicas y conductividad eléctrica hacen de este un material interesante para diversas aplicaciones, Además como material de investigación.

Este trabajo busca proporcionar información sobre el comportamiento del cobre a la corrosión atmosférica en la ciudad de Cartagena de Indias e identificar la tipología de la corrosión como producto que se presenta de manera visual y superficial del material, tras el transcurso que abarco durante el primer año de exposición en dos lugares distintos durante tres tiempos diferentes especificados (1, 6 y 12 meses). Los resultados del estudio permiten obtener información para mitigar los efectos de los agentes contaminantes en el cobre, Además, se pretende sugerir técnicas para su uso como caso de estudio y aporte investigativo en proyectos similares.

Cabe destacar que la realización de este trabajo tiene la finalidad de cumplir con unos de los requisitos para optar al título de Ingeniero Electromecánico, además aporta en el ámbito académico la oportunidad de ampliar los conocimientos adquiridos durante la carrera de ingeniería permitiendo amortizar las enseñanzas y aplicarlas a la solución al problema.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo general

Evaluar la Corrosión Atmosférica del Cobre expuesto durante un año en la ciudad de Cartagena de Indias, según los lineamientos de la norma ISO 9223.

### 1.3.2 Objetivos específicos

- Establecer la velocidad de corrosión atmosférica del cobre durante el primer año de exposición en la ciudad de Cartagena de Indias.
- Identificar la morfología del producto de corrosión formado en la superficie del cobre mediante microscopía electrónica de barrido.
- Estudiar el comportamiento electroquímico del cobre de muestras expuestas hasta 1 año mediante EIS y curvas de polarización.
- Interpretar los resultados de impedancia electroquímica mediante el método de circuito eléctrico equivalente empleando el software NOVA de Metrohm-Autolab.
- Analizar los espectros de impedancia electroquímica y curvas Tafel obtenidas para el cobre en muestras expuestas en dos sitios de la ciudad de Cartagena durante primer año de exposición.
- Estimar la velocidad de corrosión del cobre en la ciudad de Cartagena de Indias, mediante el uso de función dosis respuesta reportada a partir de estudios internacionales, a tiempos de exposición entre 1 y 10 años
- Determinar la correspondencia del comportamiento electroquímico del cobre en la atmósfera de Cartagena en relación con los parámetros ambientales de la ciudad y la velocidad de corrosión.

#### **1.4 Alcance**

El proyecto se limita a la evaluación del comportamiento a la corrosión atmosférica del cobre electrolítico expuesto en dos lugares de la ciudad de Cartagena de Indias (zona fortificada y distrito urbano) luego de 1, 6 y 12 meses de exposición. Para ello, se examinarán muestras de cobre electrolítico que ya fueron expuestas y retiradas en dos sitios de la ciudad de Cartagena de Indias en el periodo 2016 a 2017. La evaluación del comportamiento se realizó mediante técnicas electroquímicas haciendo uso del equipo potenciostato referencia PGSTAT302N marca autolab, disponible en la sede Sur de la Universidad Antonio Nariño.

## 2 Capítulo

### Marco Teórico

#### 2.1 Ubicación de Cartagena de Indias

Colombia se encuentra en el noroeste de América del Sur, con una extensión territorial de 1.141.748 kilómetros cuadrados. Es el único país sudamericano con costas en el océano Pacífico y el océano Atlántico. Cartagena, ubicada en la costa caribeña de Colombia, es la capital del departamento de Bolívar. [11]

La ciudad se encuentra en la latitud  $10^{\circ} 25' 30''$  N y longitud  $15^{\circ} 32' 25''$  W con respecto al meridiano de Greenwich. Cartagena de Indias tiene un clima cálido y húmedo, influenciado por los vientos que soplan de diciembre a marzo, lo que genera una estación seca y otra lluviosa. La temporada de lluvias se extiende de mayo a noviembre, con las mayores precipitaciones en octubre, mientras que la temporada seca va de diciembre a abril. La precipitación media anual es de 950 mm y la temperatura media es de  $27^{\circ}\text{C}$ . [11]



Ilustración 1 Mapa de Cartagena de Indias [12]

#### 2.2 Agentes contaminantes de la ciudad de Cartagena de Indias

En Colombia hablar de contaminación atmosférica es prácticamente uno de los ejes fundamentales de las problemáticas ambientales actualmente, en el desperfecto en la calidad del aire ha dado de manera directa que haya un incremento de manera negativa sobre el alcance en salud del ser humano, como también del medio ambiente. Durante largos periodos de exposición, la densidad de algunos contaminantes en la atmósfera que se superponen sobre estándares en cuanto a la relación de normas ambientales, se ha visto que se debe reforzar e impulsar más la gestión de calidad del aire para mitigar e ir disminuyendo la afectación en la salud poblacional del ser humano y a su vez del medio ambiente.

Con el paso del tiempo, en la última década se han dado procesos a desarrollo de instrumentación para así darle control a la contaminación del aire. A su vez se requiere como de manera exigente en la formulación de una política de control y prevención de la contaminación del aire, ya que podría conllevar una posible garantía en la regulación y consistencia de estas políticas sectoriales a nivel ambiental, de manera estructurada se quiere gestionar un cumplimiento para que los niveles de la calidad del aire sean aceptables.

A nivel nacional sobre esta estructura institucional, se establece que hay entidades públicas y privadas que intervienen dentro de unas responsabilidades del Ministerio del Ambiente, corporaciones autónomas regionales, corporaciones para el desarrollo sostenible, y autoridades que se refieren al artículo 66 de la Ley 99 de 1993 y también del artículo 13 de la Ley 768 del 2002. Por otra parte, también los Ministerios de Minas y Energía, Depto. Nacional de planeación e instituto de hidrología han determinado la colisión de fuentes contaminantes como por ejemplo actividades del sector industrial, también en el gremio del transporte, esta responsabilidad debe superar más el cumplimiento y control sobre ello en las normas que existen, atribuyendo lineamientos en responsabilidad empresarial-social.

## 2.2.1 Categorización de contaminantes

Frecuentemente podemos encontrar dos grupos para nuestro interés en el cual están: contaminantes por SO<sub>2</sub> (Dióxido de azufre) y otro que se relaciona directamente con la salinidad por aire. Estos siendo característicos tanto para la atmosfera que se localiza de manera marina, industrial y urbana que se enfocan en nuestro alcance. [13]

### 2.2.1.1 Clasificación de SO<sub>2</sub>

En la atmosfera estándar tenemos la siguiente clasificación, para la cual se determinan diferentes concentraciones para el contaminante tipo P

*Tabla 1 Categorización por contaminación de sustancias que incluye azufre mediante SO<sub>2</sub>*

| Velocidad deposición de SO <sub>2</sub><br>Mg/ (m <sup>2</sup> . día) | Concentración de SO <sub>2</sub><br>µg/m <sup>3</sup> | Categoría      |
|---|---|----------------|
| $Pd \leq 10$  | $P_c \leq 12$   | P <sub>1</sub> |
| $10 < Pd \leq 35$   | $12 < P_c \leq 40$                                    | P <sub>2</sub> |
| $35 < Pd \leq 80$   | $40 < P_c \leq 90$                                    | P <sub>3</sub> |
| $80 < Pd \leq 200$  | $90 < P_c \leq 250$                                   | P <sub>4</sub> |

La norma internacional ISO 9225 destaca la tipología del dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), para la cual se emplean métodos de disposición y volumetría (Pd y Pc, respectivamente). Cuando se realizan las mediciones de manera efectiva, los resultados se expresan de la siguiente forma:  $Pd = 0,8 * Pc$

Uno de los objetivos de esta norma es calcular la velocidad de deposición de azufre y su concentración a partir de mediciones frecuentes realizadas durante al menos un año, de modo que sean representativas a nivel anual. Es importante destacar que la contaminación por dióxido de azufre se considera de categoría P3, lo que indica una calificación extrema. Esta contaminación es recurrente y se observa en microclimas operativos que tienen un alcance mayor según la norma mencionada anteriormente. [14]

### **2.3 Datos meteorológicos de la ciudad de Cartagena de Indias**

En base al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) la ciudad de Cartagena exhibe clima cálido-seco, durante el año, en cuanto a la temperatura está oscila entre 24°C y 32°C, ocasionalmente baja o sube; la temporada de calor dura por lo general 3 meses, en fechas tentativas de finales de mayo a inicios de septiembre. La temporada fresca tiene una duración aprox. De 2 meses, que concurrentemente se presenta de inicio de enero a mediados de marzo, siendo la temperatura media diaria es inferior a 30°C. El mes más frío del año se produce en enero, La temperatura máxima promedio es de 30°C y la temperatura mínima es de 24°C. [15]

En cuanto a la humedad relativa si es elevada ya que la ciudad está ubicada en el mar caribe, por ende, el valor promedio es un tentativo de 85%, que tiene por consiguiente los primeros meses del año valores por debajo a 82%. Con referencia al mes que contiene la mayor humedad relativa se debe al mes de octubre, logrando alcanzar un alcance máximo de 87%. Por otro lado, la precipitación tiene un rango entre 50 mm y 280 mm y en el año que presentó valores de menor lluvia se debe a 2015 y el de mayor lluvia en el año 2016, para promedio mensual de precipitación acumulada es de 100 mm aproximado por año, ya que los primeros meses del año son casi que nulos en lluvia, retomando para el mes de octubre tiene mayor precipitación, ya que llega a superar más de 200 mm en promedio mensual de precipitación [15].

#### **2.3.1 Calificación de corrosión en la atmosfera**

Para la corrosión en la atmosfera encontramos cinco categorías en las cuales se determinan de la siguiente manera:

Tabla 2 Categorías de corrosión en la atmósfera [14]

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

En la siguiente tabla se especifica que estas categorías son válidas para aquellos resultados que son obtenidos, ya siendo como pérdida de peso a partir de los datos obtenidos mediante la meteorología nombrada.

#### 2.4 Distribución de corrosividad por medición de velocidad de corrosión

Tabla 3 Velocidad de corrosión ( $r_{corr}$ ) en un año de exposición del cobre para las múltiples categorías de corrosividad [14]

| Categorías de Corrosividad | Velocidad de corrosión de metales ( $r_{corr}$ ) |                           |
|----------------------------|--|---------------------------|
|                            | Unidades   | Cobre                     |
| C1                         | $g/(m^2 \cdot a)$                                | $r_{corr} \leq 0.9$       |
|                            | $\mu m/año$                                      | $r_{corr} \leq 0.1$       |
| C2                         | $g/(m^2 \cdot a)$                                | $0.9 < r_{corr} \leq 5$   |
|                            | $\mu m/año$                                      | $0.1 < r_{corr} \leq 0.6$ |
| C3                         | $g/(m^2 \cdot a)$                                | $5 < r_{corr} \leq 12$    |
|                            | $\mu m/año$                                      | $0.6 < r_{corr} \leq 1.3$ |
| C4                         | $g/(m^2 \cdot a)$                                | $12 < r_{corr} \leq 25$   |
|                            | $\mu m/año$                                      | $1.3 < r_{corr} \leq 2.8$ |
| C5                         | $g/(m^2 \cdot a)$                                | $25 < r_{corr} \leq 50$   |
|                            | $\mu m/año$                                      | $2.8 < r_{corr} \leq 5.6$ |

#### 2.5 Informe de niveles de contaminación según resolución 2254/2017.

Según la resolución 2254 expedida el 1 de noviembre del 2017, la polución del aire es una de las preocupaciones más significativas debido a su gran afectación en la comunidad en términos de salud, contaminación del agua, desastres naturales y costos sociales. En respuesta a esto, se han establecido regulaciones que consisten en una serie de decisiones y normativas destinadas a limitar y controlar los niveles de contaminación en diferentes áreas, con el propósito de optimizar la disposición y existencia de la comunidad ayudando a mitigar el acrecentamiento de las condiciones mencionadas inicialmente. La Resolución 2254/2017 establece niveles máximos de contaminantes del aire y se define como una resolución sobre la calidad del aire, sirviendo como base para comparaciones, análisis y toma de decisiones sobre las características del aire en diferentes regiones del territorio colombiano. [16]

Tabla 4 Niveles máximos permisibles criterio en el aire [16].

| Contaminante      | Nivel máximo Permisible ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | Tiempo de Exposición |
|-------------------|--|----------------------|
| PM <sub>10</sub>  | 50   | Anual                |
|                   | 100  | 24 horas             |
| PM <sub>2.5</sub> | 25   | Anual                |
|                   | 50   | 24 horas             |
| SO <sub>2</sub>   | 50   | 24 horas             |
|                   | 100  | 1 hora               |
| NO <sub>2</sub>   | 60   | Anual                |
|                   | 200  | 1 hora               |
| O <sub>3</sub>    | 100  | 8 horas              |
| CO                | 5.000  | 8 horas              |
|                   | 35.000   | 1 hora               |

Min. Ambiente 2017 [16]

## 2.6 Descripción general de los agentes contaminantes

PM<sub>10</sub>: se refiere a las sustancias que tienen un tamaño inferior a 10  $\mu\text{m}$  y se encuentran en el aire como resultado de erupciones volcánicas, incendios forestales, construcción, agricultura, entre otros. Debido a su pequeño tamaño, estas partículas pueden penetrar fácilmente en el medio ambiente. [16]

SO<sub>2</sub>: El dióxido de azufre es un gas que se genera principalmente a partir de la ignición de carburantes a base de petróleo y erupciones volcánicas. Este gas reacciona con el vapor de agua para formar ácido sulfuroso (H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>), el cual puede ocasionar lluvia ácida y aumentar la corrosión en estructuras metálicas. Además, contribuye a la formación de sulfato amónico, lo que incrementa los niveles de PM<sub>10</sub>. [16]

El Dióxido de Azufre de origen antropogénico puede alcanzar concentraciones significativas en las atmósferas cercanas a centrales térmicas, áreas contaminadas por humos industriales y residenciales, así como en zonas afectadas por el transporte, entre otros. Este compuesto se genera al quemar combustibles que contienen azufre

NO<sub>2</sub>: dióxido de nitrógeno se forma a partir de la reacción química entre el nitrógeno y el oxígeno a altas temperaturas, como las que se encuentran en tormentas eléctricas y motores de combustión interna. Aunque el dióxido de nitrógeno no se oxida rápidamente, puede convertirse en ácido nítrico, el cual reacciona con el vapor de agua, dando lugar a la formación de lluvia ácida. Esta lluvia ácida puede causar corrosión y erosión en materiales expuestos, como el cobre. [16]

## 2.7 Generalidades del cobre

El cobre, con el símbolo Cu y número atómico 29, es un metal de transición y uno de los metales no ferrosos más significativos. Su importancia radica en la combinación de sus propiedades químicas, físicas y mecánicas, así como en sus propiedades eléctricas y su abundancia. Los humanos han utilizado el cobre desde tiempos antiguos, siendo uno de los primeros metales. Es conocido por su dureza y resistencia, ya que puede resistir impactos, tensión y empuje sin romperse físicamente. [17]

### 2.7.1 Propiedades químicas del cobre

El cobre presenta de manera estable los estados de valencia +2 (Cúprico), +1 (Cuproso). Es un metal pasado según el valor de su densidad  $8.96 \text{ g/cm}^3$  a una debida temperatura de  $20^\circ\text{C}$ , dependiendo en ocasiones de la actividad comercial o manufactura el valor podría encontrarse en un rango de  $8.90$  a  $8.94 \text{ g/cm}^3$ . [17]

Por otra parte, este es un buen conductor eléctrico y térmico, presenta también resistencia al desgaste. [17]

### 2.7.2 Características del cobre

Valores de referencia de las temperaturas de función y ebullición de  $1085^\circ\text{C}$  y  $2560^\circ\text{C}$ , respectivamente. Contiene débiles electrones de valencia en su estructura atómica, pudiendo así desplazarse de manera libre, Sin embargo, al enrollarse con hilos de cobre para formar una bobina, se puede generar un campo magnético. Aunque se sabe que el cobre no tiene propiedades magnéticas, el resultado es una bobina capaz de generar un campo magnético. El cobre posee una gran capacidad en conducir el calor (alta conductividad térmica). [17]

## 2.8 Categoría de corrosividad de la atmósfera.

Tabla 5 Categorías de corrosividad de la atmósfera [14]

| CATEGORIA | CORROSIVIDAD |
|-----------|--------------|
| C1        | muy bajo     |
| C2        | bajo         |
| C3        | medio        |
| C4        | alto         |
| C5        | muy alto     |
| CX        | extremo      |

ISO 9223 2012 [14]

### 2.8.1 Norma ISO 9223:2012

La norma internacional ISO 9223:2012 tiene como objetivo establecer un sistema de clasificación para evaluar la corrosividad de los ambientes atmosféricos en metales y aleaciones, con un enfoque específico en el cobre. Esta norma toma en cuenta factores como la contaminación por dióxido de azufre y salinidad en el aire, que pueden afectar al metal. Además, define categorías de corrosividad según la tasa de corrosión del primer año de muestras estándar y proporciona funciones dosis-respuesta para estimar dicha categoría. También permite una estimación informativa basada en el conocimiento de la situación ambiental local. Atmosféricos. [14]

### 2.8.2 Funciones dosis-respuesta

Funciones dosis-respuesta para el cálculo de la pérdida de masa y velocidad de corrosión de metales estructurales para el primer año:

$$R_{corr} = 0.0053 \cdot pd^{0.26} \cdot \exp(0.059 \cdot RH + f_{cu}) + 0.01025 \cdot S_d^{0.27} \cdot \exp(0.036 \cdot RH + 0.049 \cdot T)$$

$$f_{cu} = 0.126 \cdot (T - 10) \text{ cuando } T \leq 10^\circ \text{ C; de lo contrario, } -0.080 \cdot (T - 10)$$

$$N = 121, R^2 = 0.88$$

*Ecuación 1 función dosis respuesta para el cobre velocidad de corrosión según norma ISO 9223-2012.*

$$ML = 3.12 + \{1.09 + 0.002201[S_{O2}]0.4[O3]Rh60 * ef(T) + 0.0878Rain[RH]\}t$$

$$f(T) = 0.083(T-10) \text{ cuando } T \leq 10^\circ \text{ C; de lo contrario, } -0.032 \cdot (T - 10)$$

*Ecuación 2 función dosis respuesta para el cobre pérdida de masa según norma ISO 9223-2012.*

$R_{corr}$  es la tasa de corrosión del metal durante el primer año, expresada en micrómetros por año ( $\mu\text{m/a}$ );  $t$  es la temp media por año, expresada por grados Celsius ( $^\circ\text{C}$ );  $RH$  es la humedad relativa promedio al año, expresada como porcentaje (%);  $Pd$  es el promedio anual  $\text{SO}_2$  deposición, expresada en miligramos por metro cuadrado por día [ $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ];  $S_d$  es el Cl promedio anual<sup>-</sup> deposición, expresada en miligramos por metro cuadrado por día [ $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ]. [14]

## 2.9 Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS)

El EIS (Espectroscopia de Impedancia Electroquímica) es un método electroquímico utilizado para caracterizar las propiedades de materiales y sistemas electroquímicos. Consiste en aplicar una perturbación senoidal de potencial de frecuencia variable al material estudiado, como placas de cobre expuestas en la Ciudad de Cartagena, y registrar la respuesta en corriente dentro de una celda electrolítica. Esta técnica proporciona información sobre la impedancia del sistema al comparar la respuesta del sistema con la onda sinusoidal suministrada. [18]

La polarización y los espectros de impedancia electroquímica (EIS) se llevaron a cabo utilizando una estación de trabajo electroquímica para analizar la naturaleza protectora de la capa de producto de corrosión formada en la muestra. Las Placas de Cobre (Cu) estuvieron expuestas al ambiente durante 12 meses en la ciudad de Cartagena de Indias, específicamente en la Universidad Mayor (carrera 3 #36-95, el centro) y posteriormente en la Universidad Antonio Nariño (UAN) (Dg. 22 #64 A- # 48, Loma de Marión). Las placas se colocaron en la terraza de las instituciones por un solo lado, con el fin de evaluar el rendimiento anticorrosivo de las capas de producto de corrosión. La exposición comenzó en enero del año 2016, con un periodo de muestreo de 1, 6 y 12 meses respectivamente. .

## 2.10 Celda electroquímica

Es una prueba de impedancia que puede contener de uno a cuatro electrodos, una de estas pruebas y la más sencilla puede ser con uso de dos electrodos, de manera habitual, el electrodo a investigar, el electrodo de trabajo, y se requiere de otro electrodo para hacer el cierre del circuito, a este se le define como el contraelectrodo, estos son sometidos en un electrolito líquido. (para esta investigación, se implementó Cloruro de sodio ACS marca J.T. 100%).

Sin importar la configuración de la celda, puede ser medido el potencial entre el electrodo de referencia (RE), junto con el cable de detección (S). Siendo así una medición de corriente en el cable del electrodo al que se le realiza el trabajo (WE). [19]

## 2.11 Aspectos de las mediciones Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS)

Como objetivo principal de los diferentes métodos, se basan en la aplicación de unas señales oscilantes que son sometidas por excitación, ya que suministra las coordenadas cartesianas y polares donde existe consigo la numeración compleja, diagrama Nyquist, diagrama Bode para la representación de los datos. Para la curva de (corriente-voltaje) de manera no lineal, dentro del sistema electroquímico se muestra como en la siguiente figura.

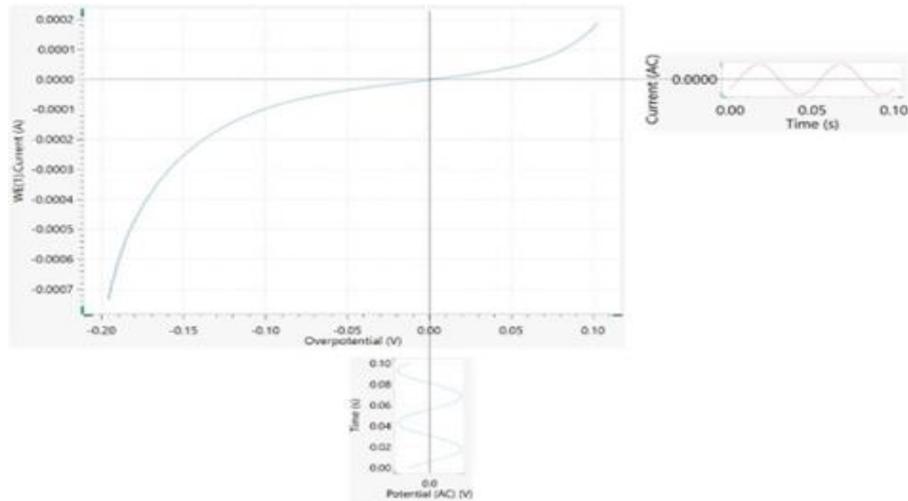


Figura 1.

Modulación de potencial y corriente registrada durante una medición de impedancia [20]

El diagrama de Nyquist es una herramienta utilizada en pruebas electroquímicas para examinar la impedancia de un sistema, ofreciendo detalles sobre la impedancia en relación con la frecuencia. Al representar los valores de impedancia medidos a diferentes frecuencias, este diagrama permite analizar diversos fenómenos en distintas bandas de frecuencia, lo que resulta fundamental para comprender los procesos electroquímicos en baterías, celdas y otros sistemas. Además, se emplea el análisis de circuito equivalente para ajustar gráficamente los datos experimentales y desarrollar modelos de circuitos equivalentes que reproduzcan la respuesta obtenida del sistema. [21]

Ejemplo de modelo que registra diferencia de potencial y corriente durante la medición de impedancia. Para la representación de datos se verifica tanto la parte real contra la parte imaginaria de la impedancia en la gráfica (Nyquist), a continuación, se muestra la figura 2.

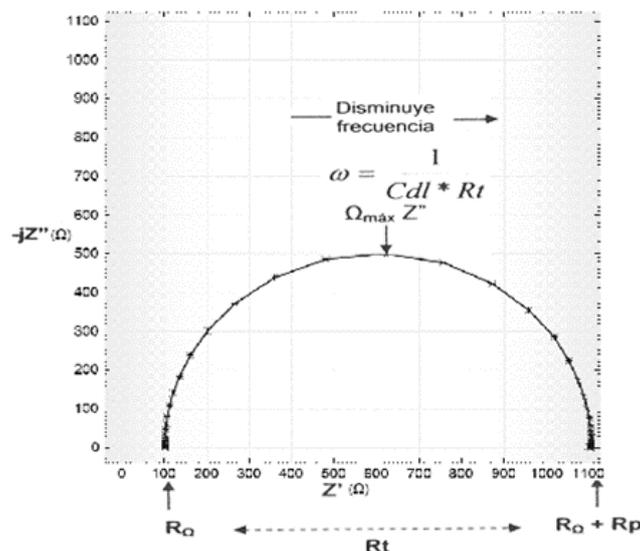


figura 2. Diagrama de Nyquist [21]

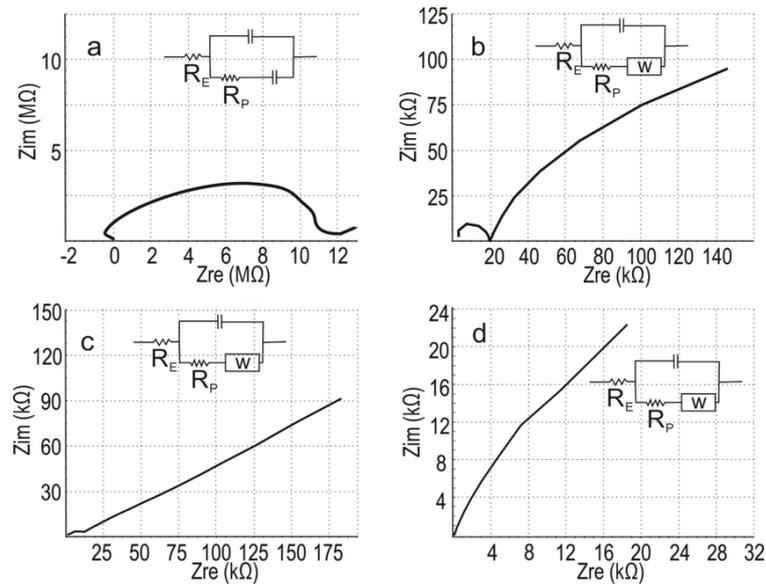


figura 3 Variación de diagrama con elementos circuito equivalente [21]

Este diagrama tiene una ventaja brindando de manera rápida una observación general de los datos, que a su vez puede ser posible la interpretación de estos datos también de manera cualitativa. Un aspecto importante en la gráfica consiste en emplear la misma escala tanto en el eje real como en el eje imaginario, de manera que los resultados no distorsionen la presentación de la curva. No obstante, tiene una desventaja al representa la información de la frecuencia, aunque se puede dar solución con el etiquetado de estas frecuencias en la curva. Para el módulo de impedancia y desplazamiento de fase hay una representación con base a la frecuencia por dos gráficas diferentes que son la gráfica Bode, que se muestra a continuación.

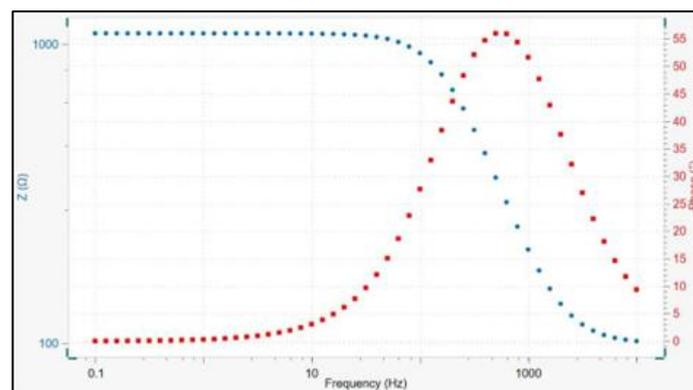


figura 4 Gráfica Bode. Curva roja punteada (fase vs frecuencia), curva azul punteada (módulo vs frecuencia) [20]

## 2.12 Ajustes de datos por medio Circuito equivalente

Para realizar un ajuste adecuado de la información recopilada por medio del (EIS), es necesario construir un circuito equivalente que incluya elementos de fase constante y resistencias. Esto permitirá obtener un valor más preciso que sea consistente con las graficas obtenidas por medio de la impedancia electroquímica (EIS). [22]

Tabla 6 Elementos comunes de circuitos equivalente [23]

| ELEMENTO                      | SIMBOLO   | EXPRESION                           |
|-------------------------------|---|-------------------------------------|
| R, resistencia                |  | $Z_R = R$                           |
| C, capacitancia               |  | $Z_C = \frac{-j}{\omega \cdot C}$   |
| L, inductancia                |  | $Z_L = j\omega L$                   |
| Q, elemento de fase constante |  | $Z_Q = \frac{1}{Y_0(j\omega)^n}$    |
| W, impedancia de warburg      |  | $Z_W = \frac{1}{Y_0\sqrt{j\omega}}$ |

En la Tabla 3 se presentan los elementos estándar utilizados en un circuito equivalente, junto con sus esquemas y ecuaciones correspondientes. Estos elementos son utilizados durante la simulación en el software Nova (versión 2.1). A continuación, se brindará una explicación detallada de cada elemento de manera individual. [24]

### 2.13 Resistencia

La resistencia no tiene una componente imaginaria en su impedancia, ya que no depende de la frecuencia del sistema. La corriente y el voltaje están siempre en fase, por lo que el valor de la impedancia resistiva es igual al valor de la resistencia misma, como se muestra en la Tabla 3. [20]

### 2.14 Capacitancia

Se observa en la representación de la Tabla 3, la capacitancia es indirectamente proporcional a la frecuencia y solo tiene una parte imaginaria. A medida que la magnitud de la frecuencia disminuye, el valor de la impedancia capacitiva aumenta. En términos fasoriales, se observa que el valor de la corriente tiene un desfase de  $-90^\circ$  respecto al potencial. [20]

### 2.15 Inductancia L

Basándose en la Tabla 3, es claro que la inductancia, al igual que la capacitancia, solo tiene una parte imaginaria. Es directamente proporcional al valor de la frecuencia a media que

la frecuencia aumenta la inductancia también aumenta. En términos fasoriales, se observa que la corriente tiene un desfase de  $+90^\circ$  en relación con el potencial. [20]

### 2.16 Elemento constante CPE

Es crucial tener en cuenta, en el análisis de impedancia electroquímica, que la superficie del material puede presentar corrosión localizada y falta de homogeneidad debido a factores como rugosidad, falta de pulido y granos. Para abordar esta heterogeneidad, se utiliza el elemento de fase constante para modelar estas variaciones en el material. [16]

Las variantes representadas en la ecuación que se detallan en la tabla 3, se describen de la siguiente manera:  $Y_0$  es la admitancia de un capacitor ideal y  $n$  representa un valor constante empírico y puede variar entre 0 y 1. Cuando  $n=0$ , el elemento de fase constante es una resistencia pura; con  $n=0,5$ , elemento es de fase constante representa un Warburg y con  $n=1$ , este representa una capacitancia pura. [22].

### 2.17 Resistencia solución (Rs)

Es la resistencia que se encuentra en la solución entre el polo de calibración y el electrodo a trabajar, la resistencia está influenciada por la forma del polo y la conductancia eléctrica del solvente. La ecuación que representa la  $R_s$  es la siguiente:

$$R_{\Omega} = \frac{1}{4kR}$$

*Ecuación 3 resistencia de la solución.*

En situaciones en las que la geometría de la prueba es muy compleja, la resistencia entre el electrodo de referencia y el electrodo de trabajo se establece experimentalmente, ya que resulta difícil calcularla únicamente utilizando la conductividad del electrolito y el radio del disco,  $k$  es la conductancia eléctrica del solvente.

### 2.18 Resistencia de polarización

Es la oposición a los efectos de oxidación al proporcionarse un valor de voltaje. Esta resistencia tiene una relación inversa con la velocidad de corrosión. Es posible llevar a cabo un análisis de la velocidad de corrosión respecto a la duración en que está expuesta la muestra, utilizando los resultados cuantitativos de  $R_p$ . Para calcular este valor, se utilizan los espectros de impedancia electroquímica (EIS) y la gráfica del módulo de Bode, que representa el valor de la impedancia respecto a la frecuencia. [20]

$$R_p = Z_l - Z_H$$

*Ecuación 4 resistencia de polarización.*

La resistencia de polarización ( $R_p$ ) se determina mediante el uso de las impedancias a baja frecuencia ( $Z_L$ ) y alta frecuencia ( $Z_H$ ). Cuanto más alta sea la disparidad entre estas impedancias, la velocidad de corrosión será significativamente menor. [20]

### 2.19 Capacitancia de doble capa, $C_{dl}$

Está directamente relacionada con electrodo y solvente eléctrico. La corriente en la muestra se divide en procesos faradaicos y no faradaicos. Los procesos faradaicos implican procesos químicos y transferencia de electrones entre la solución y el electrodo. Mientras que los procesos no faradaicos se deben a deserciones iónicas que alteran el circuito en corriente alterna. La formación de la capacitancia de doble capa se presenta una vez los iones del solvente se aproximan al área del electrodo y generando cargas con signos contrarios, creando así una doble capa eléctrica. [25]

### 2.20 Pseudo capacitancia o elemento de fase constante

En el análisis de impedancia electroquímica, se utilizan elementos que imitan o simulan la respuesta de una capacitancia del sistema estos se llaman: pseudo capacitivos y permiten adaptarse de manera más eficientes a la información experimental recopilada por medio del EIS. Estos elementos, consisten en una  $R$  en paralelo con un elemento de fase constante, representan las cargas faradaicas asociadas con reacciones químicas y la transferencia de carga entre la solución y electrodo. A diferencia del elemento mencionando anteriormente, Este elemento tiene la facilidad de retener estas cargas, El flujo de carga es considerablemente afectado por las condiciones exteriores del electrodo, el cálculo del valor de la pseudo capacitancia puede establecerse empleando la siguiente ecuación. [24]

$$C_{pseudo} = Y_0 \frac{1}{\omega^n} \cdot R^{(n-1)}$$

*Ecuación 5 elemento de fase constante.*

Donde “ $n$ ” corresponde al exponente y “ $Y_0$ ” corresponde a la conductividad del elemento de fase constante, respectivamente.

### 2.21 Circuito eléctrico equivalente para ajuste EIS.

El método circuito eléctrico equivalente usado para analizar la respuesta del sistema electroquímico evaluado mediante espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS), requiere la interpretación de los datos con la ayuda de modelos adecuados Por tal motivo el

modelo de circuito equivalente que se empleó para la presente investigación para analizar los resultados de impedancia.

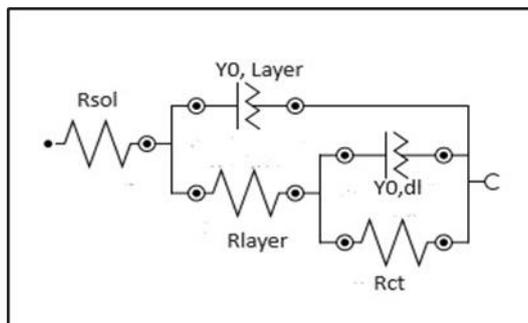


figura 5 Modelo de circuito equivalente [26].

El circuito expuesto es una herramienta útil para ajustar los valores experimentales y facilitar la interpretación de los espectros de impedancia electroquímica en estudios. Los elementos representados en la figura 5 son descritos de la siguiente manera:  $R_s$  es la resistencia de la solución,  $Y_{0, \text{layer}}$  y  $R_{\text{layer}}$  representan la capacitancia y la resistencia de la capa de producto de corrosión o resistencia de la película de corrosión formada en la placa. Estos parámetros son importantes para caracterizar y comprender las propiedades electroquímicas de la capa de producto de corrosión en un sistema. Los elementos  $Y_{0, \text{dl}}$  y  $R_{\text{ct}}$  representan la capacitancia de doble capa y la resistencia de transferencia de carga, respectivamente. Estos parámetros son esenciales para comprender y analizar la respuesta electroquímica de sistemas e interfaces. [26]

Este circuito se usa generalmente para modelar los espectros de impedancia electroquímica de elementos para muestras con un tiempo de exposición, ya que incluye elementos que modelan las características del producto de corrosión formado con el tiempo. Con ayuda de este circuito se puede simular y analizar los diagramas de bode y Nyquist aproximándose a valores relativamente ideales para su facilidad en interpretación y análisis de resultados experimentales.

## 2.22 Microscopía Electrónica de Barrido SEM

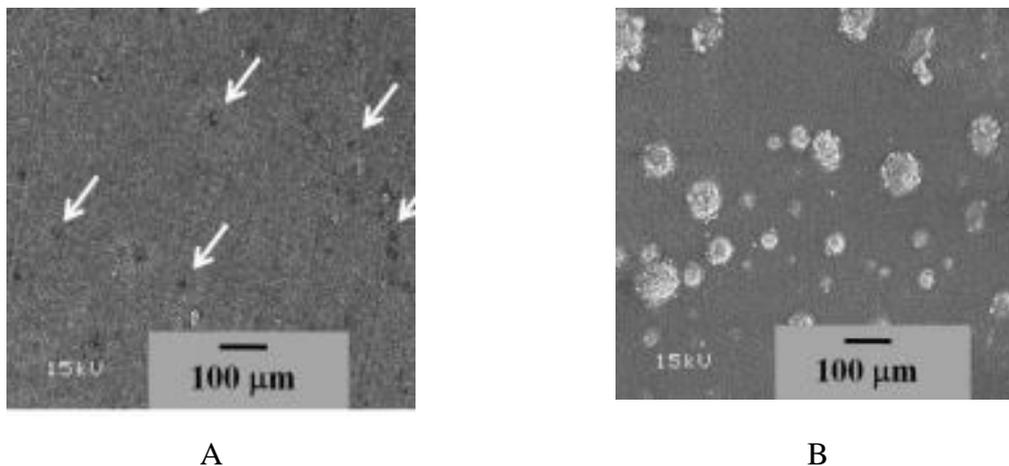
**SEM** (Scanning Electron Microscope), la microscopía electrónica de barrido es un instrumento que se utiliza para la visualización superficial de materiales en estudios e investigaciones de corrosión. Permite obtener datos morfológicos y otros detalles importantes. [27]

Para el uso de este instrumento y el análisis de las muestras en SEM, estas deben encontrarse libres de humedad, pero con la condición de que estas sean conductoras. Esta

técnica tiene como caracterización una variedad de materiales entre los cuales pueden ser aleaciones del metal, polímeros, fibras, biomateriales y muy escasamente muestras de minerales.

El SEM comprende un haz de luz que se genera por medio de una descarga electrones que son impulsados por una diferencia de potencial que oscila entre 0.1 kV a 30 kV para conseguir imágenes de la estructura morfológica del material cobre. Esto nos permite visualizar en detalle la composición y características del material de cobre. [27]

Las imágenes de ejemplo que se obtienen de la aleación después de haber sido expuesta a la atmósfera proporcionan información detallada sobre la forma en que la corrosión afecta la superficie del cobre. A continuación, se presentan las figuras A y B, que muestran los resultados obtenidos en cada sitio de estudio respectivamente.



*Ilustración 2 Imágenes de pruebas SEM*

Las imágenes revelan el comportamiento de corrosión del metal, así como la corrosión por picaduras que se evidencia en las aleaciones de cobre en estos sitios de exposición representados en la figura A, mostrando diferencias notables. En la Figura B, se observa la presencia de humedad a pesar de un aumento en la densidad tanto de cloruros como de azufre que intervienen en la atmósfera. Estos hallazgos proporcionan una comprensión detallada de los efectos de la corrosión en el cobre expuesto en estos entornos específicos, lo que es crucial para evaluar y abordar los impactos de la corrosión en estructuras y materiales. [27]

### 2.23 Análisis en el procedimiento espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS)

Es un proceso en el que se determinan las prácticas que se establecen en sistemas electroquímicos de manera compleja. En este procedimiento se aísla y se distinguen tanto fenómenos físicos como químicos por medio de la aplicación de un potencial, ya que en técnicas electroquímicas tradicionales no son posibles evidenciar dichos fenómenos.

Cuando se trata de EIS Potenciostático, se establece una onda sinusoidal que tiene amplitud baja de una frecuencia, y se sobrepone ante un voltaje de polarización, dando a entender que hay por respuesta una corriente de onda sinusoidal que se sobrepone a una corriente continua.

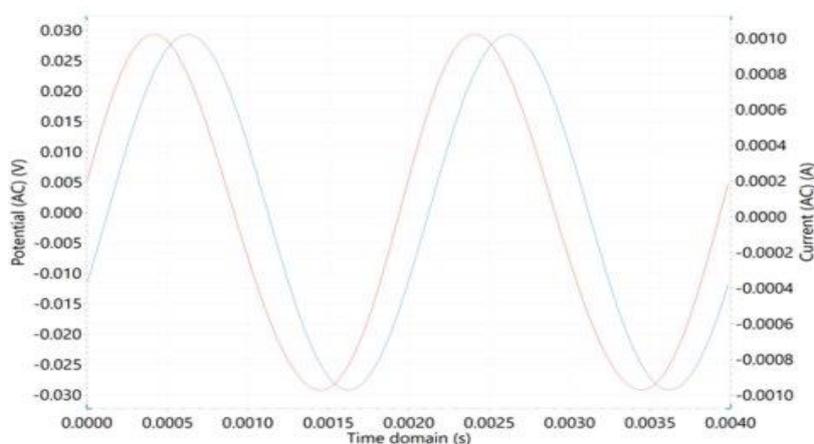


figura 6 Grafica onda sinusoidal

### 2.24 Amplitud (Onda sinusoidal)

La impedancia del material a analizar es importante que este sea de manera lineal, ya que esta respuesta conlleva a que sea una pequeña perturbación en su amplitud de onda. Por muy mínimo que sea el valor puede generar una mala señal (ruido) y por ende datos incoherentes. Generalmente se sugiere usar un valor de 10 mV para los sistemas electroquímicos para no alterar los resultados.

### 2.25 Tiempo de integración

En el proceso cuando la amplitud de perturbación disminuye, la señal es mínima. Cuando se busca poder mejorar esta relación, se toman promedios de varias mediciones sobre los diferentes ciclos (ondas sinusoidales). A este proceso se le conoce como integración, a su vez al generar un aumento en el tiempo de integración es directamente proporcional a la relación del ruido.

## 2.26 Rango de frecuencia

Al realizar las pruebas, hay un rango de delimitación por el instrumento además de las consideraciones del software, pero se debe saber elegir un rango apropiado en frecuencia amplio para poder determinar las capturas de las constantes del tiempo durante dichas mediciones. sabiendo que los potenciostatos pueden llegar a 1MHz o inclusive más, la frecuencia alta durante el proceso de escaneo de impedancia está limitado a su valor posible y dependiendo también del electrodo como referencia en su respuesta.

Por otra parte, se sabe que el inverso de la frecuencia es el tiempo de medición. Así como hay un límite alto de frecuencia, también se tiene un límite de frecuencia bajo, y como resultado en un tiempo extendido en recopilar el escaneo de manera completa. Para ejemplificar podemos decir que en una medición de un margen de datos que usa una frecuencia de 1mHz debería llevar por mínimo 1000 s.

Hay sistemas que cambian con el tiempo en nuestro caso como se trata de corrosión, implica muy específicamente que cambia en el transcurso de la toma de datos. Generalmente se toman rangos de frecuencia entre 100 kHz a 0,1 Hz en la mayoría de los casos en sistemas electroquímicos, donde se estima un tiempo prudencial de la medición de esta frecuencia por 10 minutos aproximadamente.

## 2.27 Curva de polarización Tafel

Cuando un material metálico se sumerge en un electrolito conductor, adquiere un potencial espontáneo en relación con un punto de referencia, conocido como potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ). Este potencial, que varía según el material y el medio circundante, permite determinar la velocidad a la que el material se corroe, lo cual es de interés para su evaluación [28]

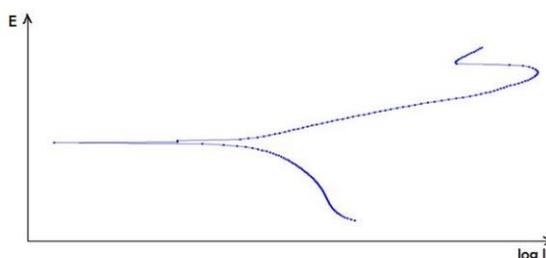


figura 7 Representación de curva Tafel [4]

Para evaluar la velocidad de corrosión utilizando métodos electroquímicos, es necesario emplear una celda electroquímica con tres electrodos: el de trabajo (muestra corroída), el de referencia (para medir el potencial de la muestra) y el auxiliar (para medir la intensidad

circulante). Se utiliza un potenciostato para modificar el potencial de la muestra por encima y por debajo del potencial libre, mientras se registra la intensidad (I) o la densidad de corriente (i) como respuesta. [28] Figura 8 Esta variación proporciona las curvas de polarización de forma experimental, y mediante la extrapolación de Tafel se puede determinar la velocidad de corrosión como una intensidad ( $I_{corr}$ ) o una densidad de corriente ( $i_{corr}$ ). Es relevante destacar que la intensidad anódica es positiva ( $>0$ ) y la catódica es negativa ( $<0$ ). [29]

El software NOVA proporciona una interfaz conveniente para realizar análisis de la tasa de corrosión a partir de una gráfica de corriente frente a potencial. En el área Propiedades del comando Análisis de la velocidad de corrosión, es posible especificar el modo de análisis (análisis de Tafel o por medio de pruebas EIS), la densidad de la muestra, su peso equivalente y el área de superficie. También es posible optar por realizar un ajuste. [25]

Para realizar un análisis de la velocidad de corrosión, se deben especificar las regiones lineales del lado anódico y catódico de la gráfica de Tafel. Esto se logra con la ayuda de cuatro marcadores, dos por el lado anódico y dos por el lado catódico, los cuales definen las líneas para las regresiones lineales. Una vez seleccionadas las regiones, las regresiones lineales aparecerán en el gráfico. Luego, se calculan el potencial de corrosión y la corriente de corrosión, como las coordenadas X e Y, respectivamente, de la intersección de las dos líneas de regresión. [30]

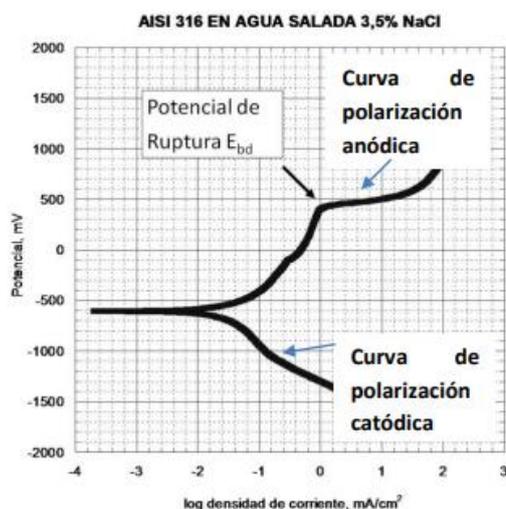


figura 8 Curva de polarización tafel para agua salina [30]

### 3 Capítulo

#### Metodología

##### 3.1 Exposición de las muestras estándar y datos ambientales

El material expuesto en el sitio fue cobre y la muestra tenía un tamaño de 10 cm × 5 cm × 0,3 cm. Las muestras se expusieron a las condiciones ambientales de la ciudad de Cartagena de Indias, colocándolas con una inclinación de 45° en la terraza de la universidad Mayor y Antonio Nariño sede de Cartagena, la exposición comenzó en el 2016, con períodos de muestreo de 1, 6 y 12 meses. En la ilustración 2 se presenta la ubicación de las Universidades en la Ciudad de Cartagena

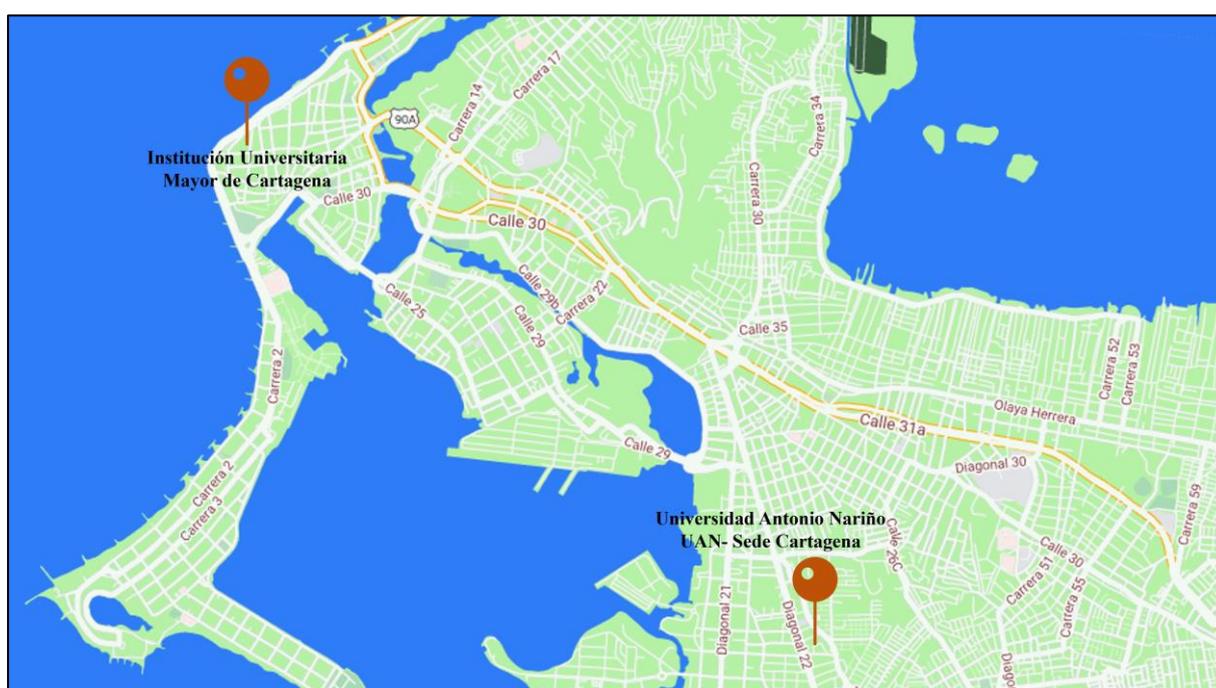


Ilustración 3 Sitios de exposición de placas [12]

Para poder examinar el comportamiento y los efectos de la corrosión en el cobre durante el período de exposición entre 2016 y 2017, se recopila información climática (precipitación, temperatura y humedad relativa) y niveles de contaminación (cloruros y sulfatos) obtenidos en informes del IDEAM y estudios realizados en la zona de Cartagena en la última década. Estos datos son esenciales para comprender los resultados obtenidos, y se lleva a cabo un rastreo de las placas después de 1, 6 y 12 meses de exposición. Además, se usó el equipo potenciostato referencia PGSTAT302N marca autolab del laboratorio de corrosión de la universidad Antonio Nariño el cual está establecido con el software NOVA de la empresa METRHOM, se sometió la placa por medio de un circuito equivalente, donde el proceso consiste en colocar agua salina,

electrodo y contra electrodo, inyectando valores de corriente a través del tiempo para verificar la velocidad de corrosión y conductividad del elemento

### **3.2 Composición y análisis químico de la muestra.**

La composición química del cobre se analizó usando la Técnica Espectrometría de emisión óptica (OES), el equipo empleado fue el BRUKER Q8 MAGELLAN con material de referencia BRAMMER BC ILOA (condiciones de análisis, humedad de 59% y temperatura de 23.5%). el cual fue llevado a cabo en la sede de investigación universitaria (SIU) de la UdeA. [31]

El resultado del ensayo indicó la siguiente composición química elemental: Zinc (Zn) 0.0022%, Plomo (Pb) 0.0023%, Fósforo (P) 0.0012%, Hierro (Fe) 0.0081, Silicio (Si) 0.0031%, Aluminio (Al) 0.0012, Azufre (S) 0.0012%. según el resultado obtenido el Cobre (Cu) tiene una composición aproximada de 99.98%, lo cual determina que el material es cobre electrolítico.

### **3.3 Velocidad de corrosión norma ISO 9223**

Para determinar la velocidad de corrosión en el cobre, se utilizan las relaciones dosis-respuesta específicas del cobre y la norma 9223 del 2012. Estos cálculos se fundamentan en las mediciones promedio anuales de los factores meteorológicos y de los agentes contaminantes del aire, los cuales son esenciales para utilizar dichas correlaciones. La velocidad de deterioro de las muestras se determina conforme a los estándares internacionales ISO 9223, siguiendo los procedimientos para calcular la disminución de peso lo que permite obtener una medida precisa del impacto de la corrosión en el cobre.

### **3.4 Impedancia electroquímica (EIS)**

Para examinar el comportamiento del cobre, se utilizó la Espectroscopía de Impedancia Electroquímica. Durante el análisis, se emplearon tres electrodos: un electrodo de referencia de cloruro de plata, un contraelectrodo de alambre de platino, mientras que la placa de cobre corresponde al electrodo de trabajo. Las mediciones se realizaron en el potencial de circuito abierto, con un rango de señal de voltaje de -0,4 V a 0,6 V, y en un rango de frecuencias de 10 kHz a 10 mHz. Además, se utilizó una solución de cloruro de 0,1 M y se evaluó un área de 0,78 cm<sup>2</sup>. Las mediciones fueron realizadas empleando un equipo Potenciostato/Galvanostato Autolab PGSTAT302N. Este enfoque detallado permitió obtener una comprensión profunda del comportamiento electroquímico del cobre en las condiciones específicas del estudio.

### **3.5 Simulación de impedancia**

Después de llevar a cabo las pruebas de EIS, se utilizó el software NOVA para evaluar la respuesta del cobre a la corrosión atmosférica. Este software permite simular el comportamiento obtenido en la impedancia a través de un circuito equivalente, como se muestra en la figura 5. Este circuito se emplea comúnmente para modelar los espectros de impedancia electroquímica de muestras con un tiempo de exposición, ya que incluye elementos que representan las características del producto de corrosión formado con el tiempo. Este circuito eléctrico equivalente ha sido empleado en el análisis de resultados de impedancia electroquímica para el cobre [26], Se plantearon varios modelos de circuito en el software y se realizaron ajustes iterativos para ajustar los elementos del circuito, sin embargo con el circuito eléctrico equivalente representado en la figura 5 se logró obtener el mejor ajuste posible, manteniéndose dentro de los rangos típicos de elementos de fase constante y resistencias. Esto facilitó llevar a cabo un análisis exhaustivo del comportamiento del cobre frente a la corrosión.

### **3.6 Microscopía electrónica de barrido (SEM)**

Se empleó un microscopio electrónico de barrido JEOL-JSM6492LV Con una precisión de 2 nm en vacío alto y 5 nm en vacío bajo, está equipado con cuatro detectores: el detector de electrones secundarios tipo E-T para capturar imágenes en blanco y negro de alta resolución de la superficie, el detector de electrones retro dispersados para visualizar una escala de grises que muestra los diferentes componentes de la superficie. Estas imágenes se utilizaron en el análisis del proyecto de elaboración de mapas de degradación del patrimonio arquitectónico en Cartagena de Indias.

## 4 Capítulo

### 4.1 Velocidad de corrosión del cobre en la ciudad de Cartagena de Indias

Es importante, en primer lugar, considerar la velocidad de corrosión atmosférica del cobre al evaluar la importancia del metal y cómo las condiciones climáticas afectan el material en la ciudad de Cartagena. El cobre se destaca entre los metales más utilizados en la ingeniería industrial y las redes debido a sus propiedades físicas. Siendo un metal dúctil y con una excelente conductividad eléctrica, es susceptible al deterioro causado por la corrosión atmosférica. En la ciudad de Cartagena de Indias, el clima tiende a ser cálido durante todo el año, contribuye a que la corrosión metálica progrese a una velocidad importante. La presencia de brisa hace que el cloruro de sodio se incorpore al ambiente desde el mar, lo que tiene efectos significativos cerca de la costa, donde el aire transporta grandes cantidades de sal y se produce una continua pulverización de agua.

*Tabla 7 Contaminantes y datos meteorológicos promedio anual sujeto a función dosis-respuesta*

|                      |  | UAN   | MAYOR |
|----------------------|--|-------|-------|
| Contaminantes        | SO <sub>2</sub> (mg/m <sup>2</sup> *día) | 51,40 | 77,50 |
|                      | Cl (mg/m <sup>2</sup> *día)              | 53,1  | 99,7  |
| Datos Meteorológicos | Humedad Relativa (%)                     | 79    | 79    |
|                      | Temperatura °C                           | 29    | 29    |
|                      | Precipitación (mm)                       | 1177  | 1177  |

En los sitios donde se llevó a cabo el registro de cloruros que se tuvieron para entonces en el aire siendo por vía húmeda, se brindan los datos que por consiguiente tienen unidades de deposición (mg/m<sup>2</sup>\*día) en el cual se basa en unidades de concentración (mg/L).

Tabla 8 Cloruros en muestras expuestas

| Mes  | Mayor (mg.m2.d UAN(mg.m2.day-1)) |       |
|------|----------------------------------|-------|
| 1    | 99,7                             | 105,1 |
| 2    | 137,6                            | 72,8  |
| 3    | 116,8                            | 122,1 |
| 4    | 59,0                             | 61,1  |
| 5    | 117,5                            | 8,9   |
| 6    | 127,3                            | 6,6   |
| 7    | 146,2                            | 5,8   |
| 8    | 135,9                            | 38,6  |
| 9    | 50,6                             | 22,0  |
| 10   | 27,8                             | 91,7  |
| 11   | 59,0                             | 49,2  |
| 12   | 77,8                             | N/A   |
| Prom | 96,3                             | 53,1  |

Los lugares cercanos al mar suelen tener una mayor concentración de cloruros. Esto se debe a su proximidad a la zona costera, donde se registraron concentraciones promedio de cloruros de 96,3 mg/L en el sitio Mayor y de 53,1 mg/L en el sitio UAN, que presenta una menor concentración, posiblemente debido a su cercanía a la zona urbana. Esta condición es común en áreas costeras, ya que la proximidad a la salinidad y al agua marina aumenta la humedad y las concentraciones de cloro. Estas tienden a adherirse a materiales más rígidos, como los sólidos, donde se produce deposición.

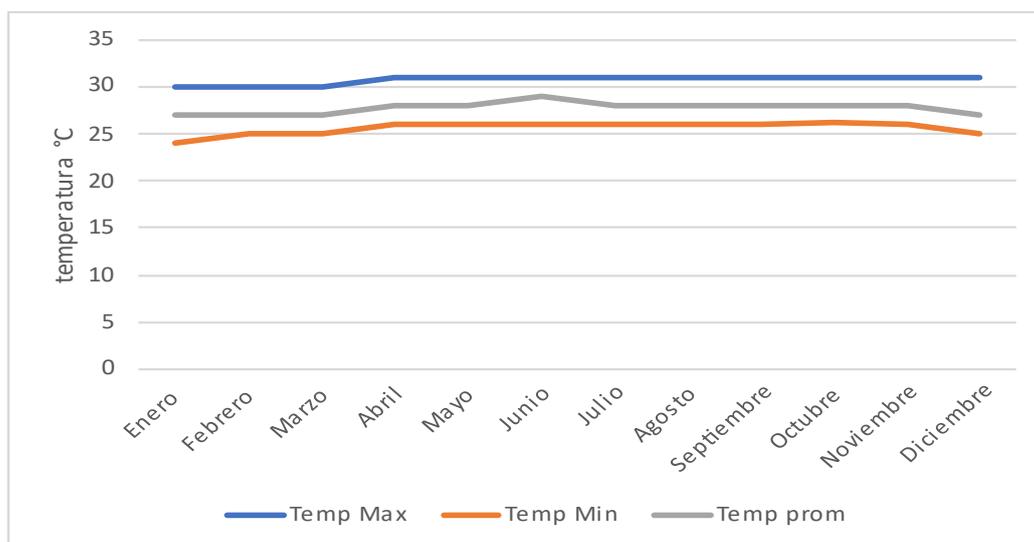


figura 9 Temperatura promedio 2016 Cartagena [15]

se puede observar en la figura 9 que la temperatura del clima para el año 2016, tiene una temperatura promedio de 30°C a 34 °C durante los meses de septiembre hasta octubre, además se puede observar en la figura 10 un aumento de la precipitación generando, aumento en la humedad. [15]

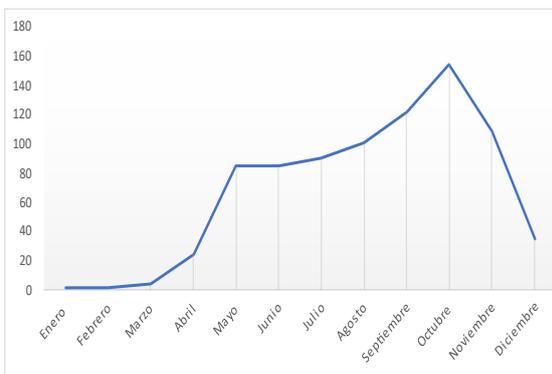


figura 10 precipitación en mm promedio [15]

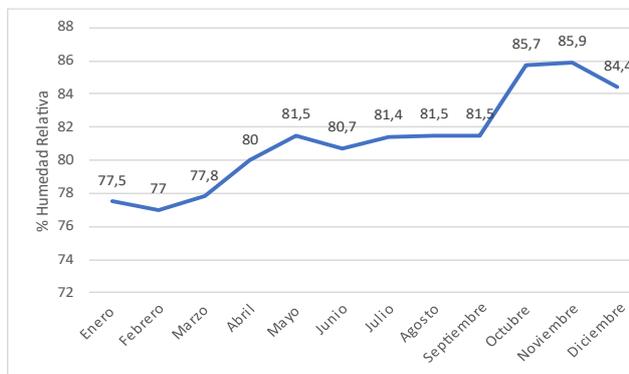


figura 11 Humedad relativa en Cartagena [15]

El día que se registró la temperatura más alta fue el 28 de junio con 36°C, en comparación con la temperatura más baja que se registró el 10 de Julio con 15°C, ahora en tema específico de velocidad del viento en su máximo registro fue de 51,9 km/h para el 19 de febrero. [15]

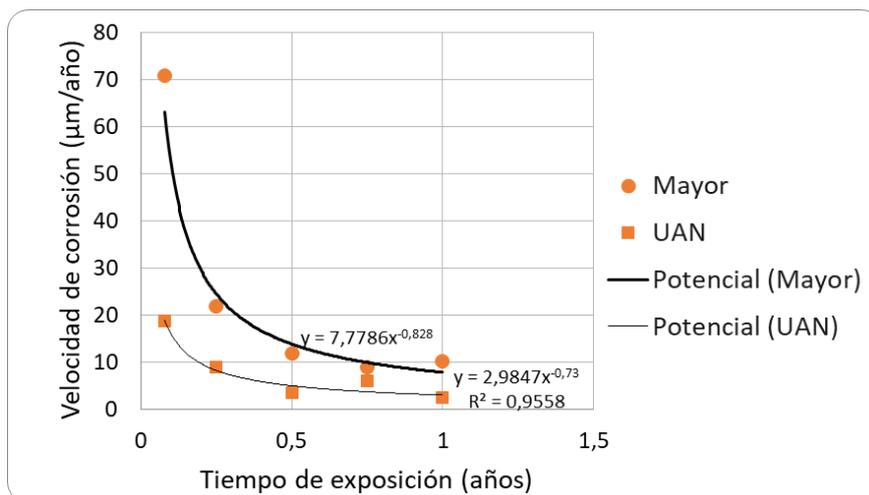


figura 12 Velocidad de corrosión de función dosis respuesta

La figura 12 presenta el valor de la velocidad de corrosión del cobre en los sitios mayor y UAN durante el primer año de exposición, lo cual muestra una disminución del valor promedio de la velocidad de corrosión con el tiempo de exposición para ambos sitios. Se puede denotar un valor menor de la velocidad de corrosión en el sitio UAN, dado que hay una tendencia decreciente en el valor promedio de velocidad de corrosión del cobre. En el caso de Mayor, la  $V_{corr}$  presenta un valor de  $70,9 \mu\text{m/año}$  en el primer mes que desciende aprox. a  $10 \mu\text{m/año}$  luego de un tiempo superior a 6 meses. En UAN la  $V_{corr}$  presenta valores entre 20 y  $5 \mu\text{m/año}$ , con los valores más bajos a partir de los 6 meses de exposición.

Según los datos obtenidos se determina que la categoría de tasa de corrosión para el cobre según la tabla 3 es la C5, ya que se presenta un mayor ataque en la universidad mayor, y C4 en UAN, siendo aproximados al ejecutar la función dosis respuesta de la ISO 9223 de 2012, como bien se demuestra exalta y es importante los datos de concentración de cloruros, en el que brinda una gran proporción a la velocidad de corrosión.

#### 4.2 Morfología del producto de corrosión formado en la superficie del cobre.

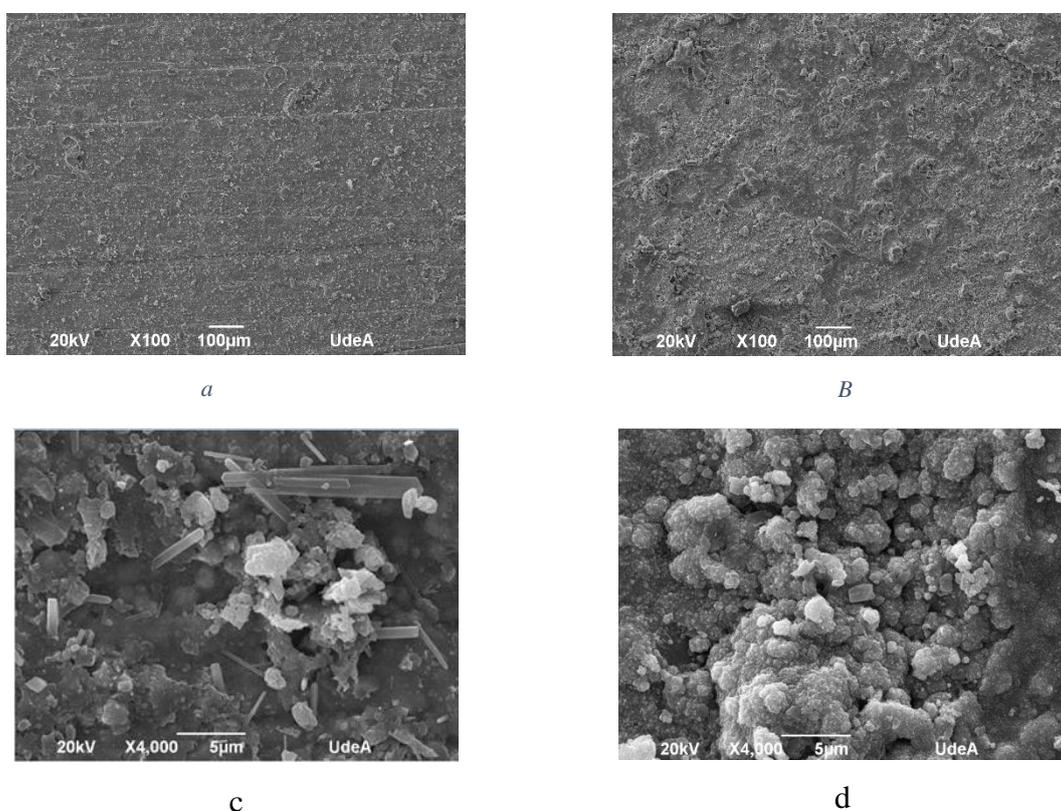


figura 13 Imagen SEM de placa expuesta 1 año UAN y Mayor

La Figura 13 presenta imágenes obtenidas de la superficie de la placa de cobre expuesta en los sitios UAN y Mayor, donde se puede observar la topografía de la capa formada sobre la placa en cada uno de los dos lugares y mirar la afectación del material debido a las condiciones de ambos sitios. Al comparar las imágenes de la Figura 13 a) y la Figura 13 b), a una magnificación de 100X, se observa un ataque generalizado sobre la superficie de la placa, indicando un ataque uniforme del material en la ciudad de Cartagena de Indias. No obstante, es evidente la mayor afectación del cobre en el lugar Mayor debido en lo posible a la alta deposición de cloruros en el ambiente, reportado en la Tabla 8, al estar más cerca de la zona amurallada. La imagen a un año de exposición no se observó un ataque relevante sobre la superficie de tipo picadura, lo cual se caracteriza en otros materiales que presentan capa pasiva.

Al observar con una mayor magnificación, figura 13 c) y 13 d) se presenta una morfología definida del producto de corrosión en la superficie de la placa en los sitios UAN y Mayor, respectivamente. En la figura 13 c), se evidencia menor densidad de producto en la superficie del material en comparación con el sitio Mayor figura 13 d), que incluye producto de corrosión y deposición de contaminantes. En las escalas de magnificación evaluadas no se evidencio presencia de picaduras en la placa, aunque es posible que se presente micro picado el cual no es visible sin remover el producto de corrosión.

En el caso de la Figura 13 a y c), el lugar de exposición se encuentra más cerca de la zona urbana, y gracias a las edificaciones vecinas, los agentes contaminantes y las condiciones meteorológicas no afectan tan directamente la placa, lo que permite que la capa de material de oxidación sea un poco menor. Además, es posible que esta capa se lave y se retire con las precipitaciones que se presentan durante el tiempo de exposición. En todo caso, se evidencia que el lugar de exposición del material es crucial, ya que se ve más afectado por los agentes contaminantes presentes en la ciudad de Cartagena.

### 4.3 Comportamiento del cobre evaluado por Espectroscopía de impedancia EIS

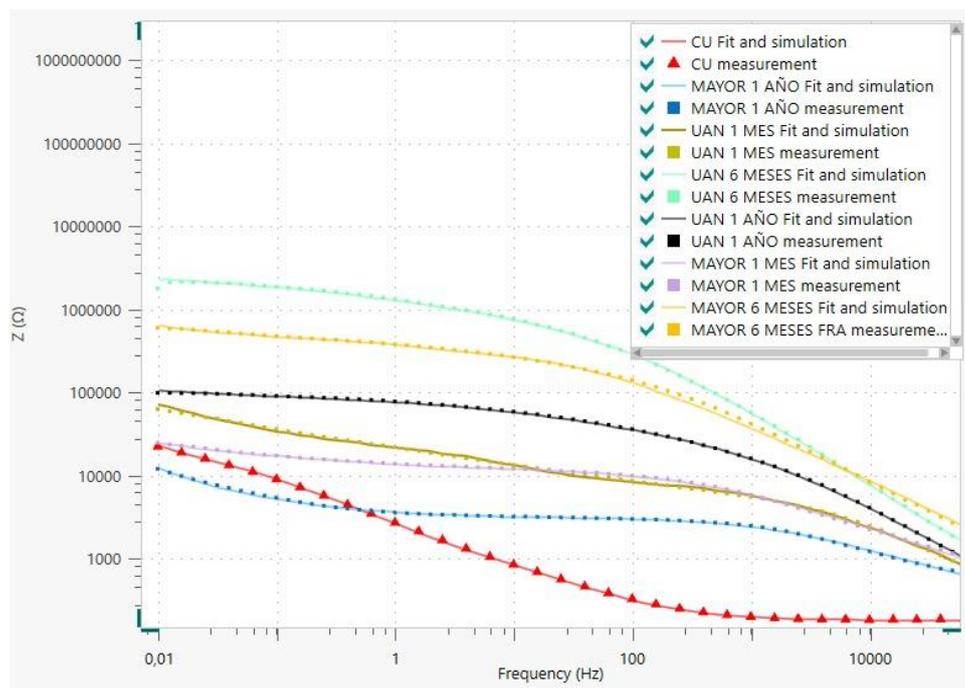


figura 14 Diagrama de bode de impedancia electroquímica de la Universidad Mayor y UAN [32]

Al realizar los ajustes de los datos experimentales tomados con el equipo de autolab por medio del circuito equivalente mostrado en la figura 5 y de hacer varias combinaciones de componentes, especialmente de variable constante, el circuito representado en la figura 5 resultó ser el más acorde y el que mejor se ajustó a las pruebas experimentales. Gracias a esto, nos permite llevar a cabo un análisis más preciso de los datos representados en los diagramas.

En la figura 14 se presenta el diagrama Bode del módulo de impedancia que presenta el valor de la magnitud de la impedancia ( $Z$ ) contra la frecuencia, donde se observa un aumento de  $Z$  a medida que disminuye el valor de la frecuencia, lo cual permite establecer el comportamiento de la impedancia del cobre expuesto.

Realizando un barrido de altas a bajas frecuencias, se puede observar que el sistema presenta un comportamiento capacitivo, reflejado en valores de impedancia por debajo de los 10 k $\Omega$ . Es interesante destacar que durante los primeros seis meses se observa un aumento significativo en la magnitud de la impedancia a altas frecuencias, sugiriendo un comportamiento más capacitivo de la capa del producto de corrosión. Por otro lado, a medida que disminuye la frecuencia, se puede observar un aumento continuo en la impedancia, aunque con una menor tendencia incremental. Esto puede ser causado por la formación de una capa protectora en el material, que actúa como una barrera parcial contra los elementos contaminantes brindando alguna protección contra la corrosión. Con el tiempo, esta barrera

puede manifestarse como una resistencia a la velocidad de corrosión. Este fenómeno es importante ya que indica la capacidad del material para protegerse y prolongar su vida útil frente a la corrosión.

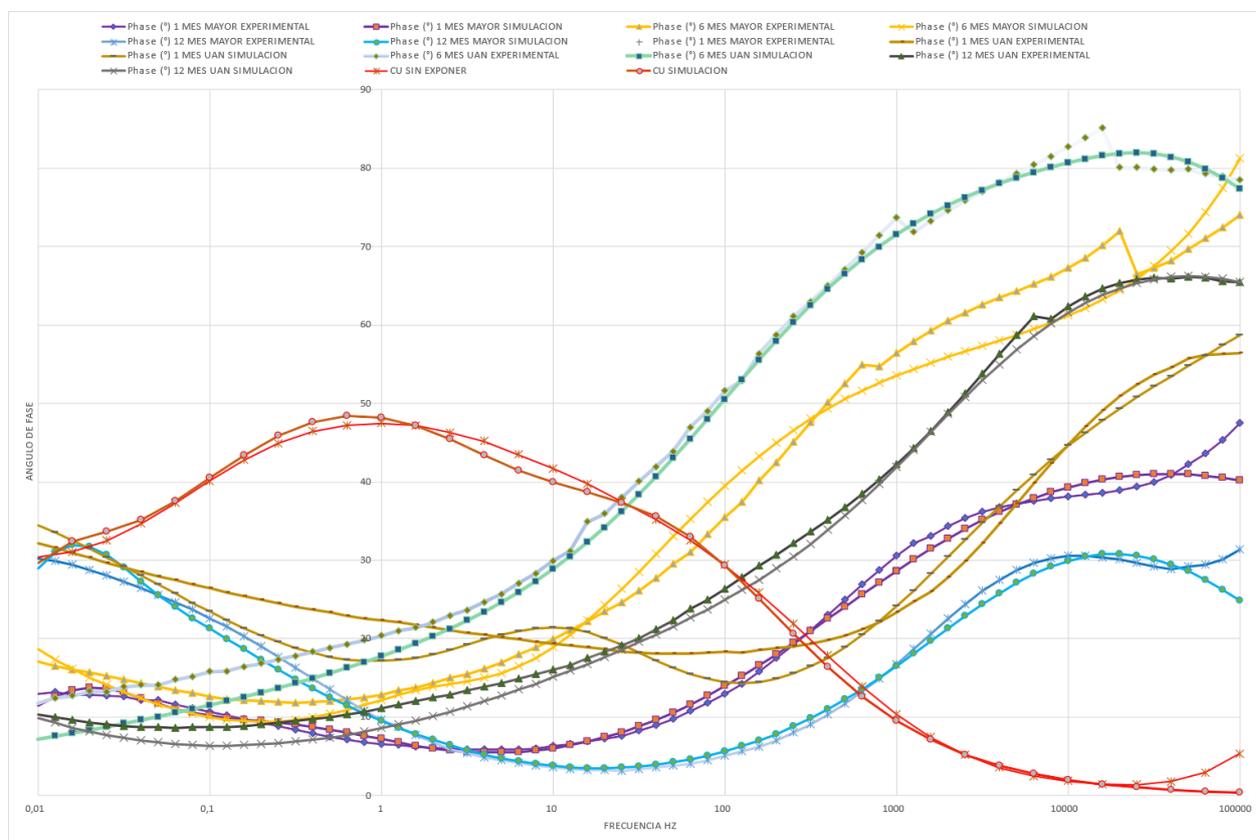


figura 15 Diagrama de fase de impedancia electroquímica de la Universidad Mayor y UAN

La figura 15 presenta el Angulo fase del cobre sin exponer y expuesto. se observa un comportamiento capacitivo del cobre sin exponer a frecuencias medias, mientras el comportamiento capacitivo se presenta a altas frecuencias en el cobre expuesto, lo cual puede presentarse debido a la capa formada sobre la superficie del material en el tiempo de exposición. Se evidencia que a los 6 meses de exposición se presenta el valor del Angulo más alto en ambos sitios, lo que se refleja directamente en la magnitud de la impedancia, indicando que el ataque es menor durante este periodo, lo cual coincide con el comportamiento presentado en la figura 14. Estos hallazgos sugieren que el material protector formado sobre la placa podría estar mitigando el efecto de corrosión, aunque este todavía se mantiene de manera constante. luego de 6 meses, el valor de fase disminuye. lo que afecta más al material o causa un mayor deterioro en la placa de cobre.

Al comparar los valores experimentales con los ajustes simulados utilizando el circuito equivalente (ver figura 5), se puede realizar una interpretación adicional en el comportamiento

del material a lo largo del tiempo. Esto proporciona información valiosa sobre cómo el cobre responde en diferentes condiciones y permite comprender mejor su comportamiento a la corrosión (lo cual se presenta más abajo en el numeral 4.5)

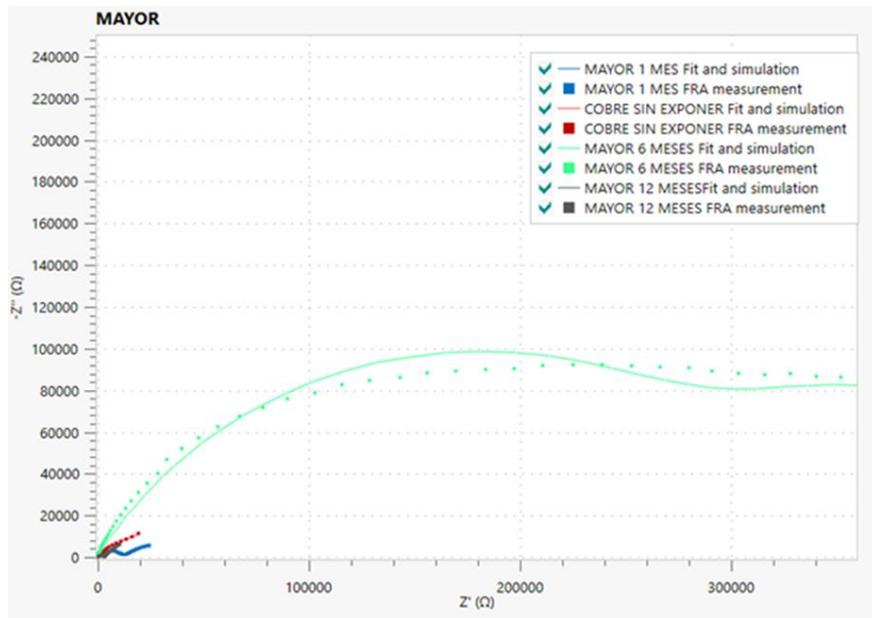


figura 16 Diagrama de Nyquist Mayor

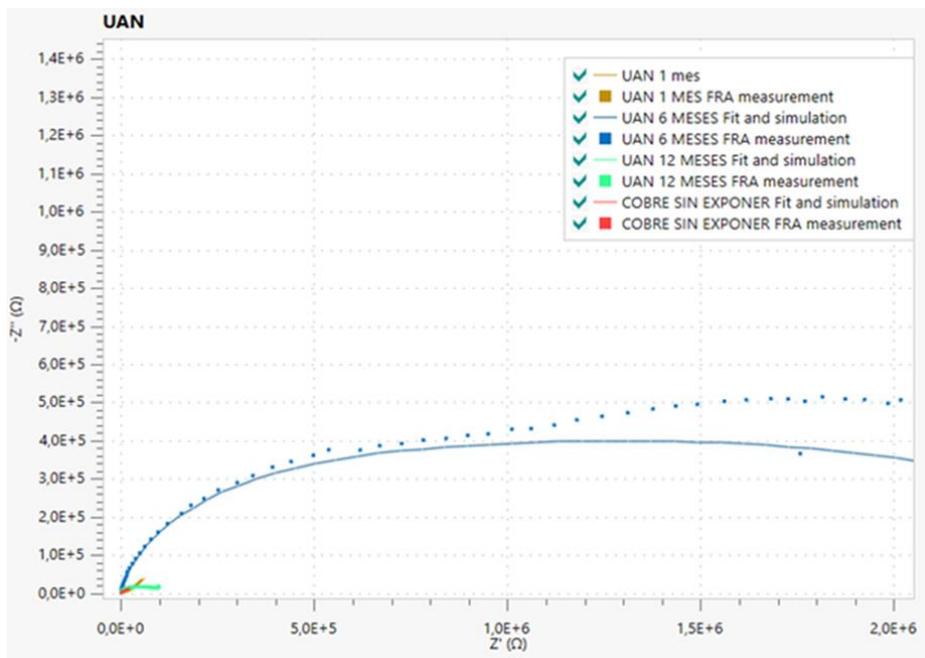


figura 17 Diagrama de Nyquist de UAN [32]

En el diagrama de Nyquist, al comparar el cobre sin exposición, un mes de exposición y seis meses de exposición, se puede observar un notable aumento de impedancia en ambos sitios (Mayor y UAN), presentando un mayor valor de la impedancia a 6 meses de exposición,

el cual corresponde a orden de magnitud superior al obtenido en el cobre sin exponer o luego de 1 mes. Sin embargo, luego de los 6 meses, la impedancia disminuye, lo que indica un mayor impacto en el material aumentando la velocidad de corrosión en ambos sitios.

Además, en el módulo de Bode se observa un aumento significativo en la resistencia de polarización a los 6 meses, especialmente en comparación con UAN. Esto indica una disminución en la velocidad de corrosión del cobre. En general, el comportamiento capacitivo observado indica que el producto formado sobre la superficie del material presenta características protectoras contra la corrosión, lo cual permite comprender cómo el cobre responde y se protege contra la corrosión en diferentes condiciones ambientales.

#### 4.4 Velocidad de corrosión instantánea del cobre a partir de curvas Tafel

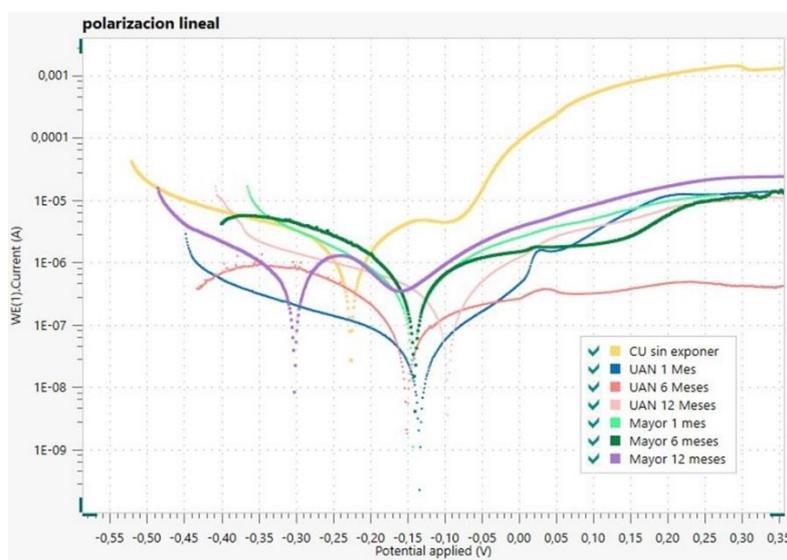


figura 18 Curva de polarización de Mayor y UAN [32]

En la Figura 15 se presentan las curvas de polarización del cobre sin exponer y expuesto en los sitios UAN y Mayor durante 1 año, que permiten estimar la velocidad de corrosión instantánea del material expuesto. Se observa una disminución del valor de la densidad de corriente de corrosión durante el primer mes de exposición en el sitio UAN, alcanzando un valor aprox de  $1 \times 10^{-7}$  Amperios. Este valor es menor al valor inicial del cobre sin exponer ( $\sim 10^{-5}$  A) y del valor en el sitio MAYOR ( $10^{-6}$  A), donde se refleja una pendiente anódica similar al cobre sin exponer. Sin embargo, en la pendiente catódica los valores de velocidad de corrosión se aproximan considerablemente para ese mismo tiempo de 1 mes, lo cual posiblemente está influenciado por el material que se forma en la placa durante el tiempo de exposición.

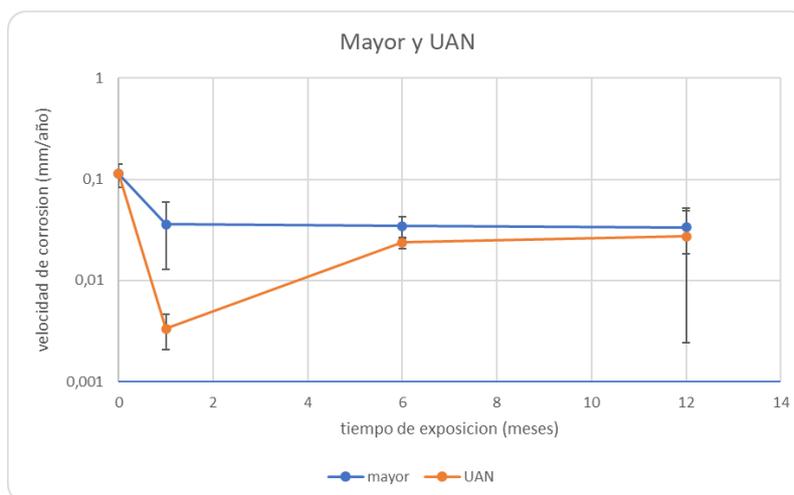


figura 19 Velocidad de corrosión instantánea del cobre durante 1 año de exposición. Fuente: Datos propios

Además, se observa un aumento en la densidad de corriente a los 6 meses tanto en lugar mayor como en UAN, lo cual indica un incremento considerable en la velocidad de corrosión (ver figura 16). Analizando la figura 15 se puede observar que el ramal anódico, tiene una prolongación de la curva respecto a comparación con el cobre sin exponer, lo cual genera una diferencia importante en la resistencia a la corrosión. Se nota en la figura 19 que después de los 6 meses, la velocidad de corrosión permanece casi constante, lo que se asocia con la estabilidad de la capa de productos de corrosión luego de 6 meses posiblemente debido al proceso continuo de lavado y secado de la superficie de la placa durante este periodo, así como una variación mínima de la temperatura durante el año y el valor casi constante de la deposición de contaminantes, cloruros y sulfatos, en la placa. Estas condiciones definen el comportamiento del material al ser expuesto a la intemperie, así como la velocidad de corrosión, causando que presenta valores asociados al nivel de contaminantes.

#### 4.5 Análisis de la impedancia electroquímica mediante circuito equivalente

Tabla 9 valores de capacitancia y resistencia de simulación de circuito equivalente [32]

| Sitio de la Muestra | Tiempo (meses) | AVERAGE de Z (ohm), f=0,01 Hz |                   |                   |                |                |
|---------------------|----------------|-------------------------------|-------------------|-------------------|----------------|----------------|
|                     |                | AVERAGE de Z (ohm)            | AVERAGE de Rlayer | AVERAGE de Clayer | AVERAGE de Rct | AVERAGE de Cdl |
| Mayor               | 1              | 1,57E+04                      | 6,43E+03          | 2,02E-05          | 1,87E+04       | 9,69E-04       |
|                     | 6              | 2,03E+05                      | 4,50E+04          | 5,07E-06          | 1,61E+05       | 5,15E-08       |
|                     | 12             | 9,02E+03                      | 2,98E+03          | 2,14E-05          | 1,87E+04       | 1,95E-03       |
| UAN                 | 1              | 8,43E+04                      | 6,87E+03          | 7,67E-06          | 1,10E+05       | 8,69E-05       |
|                     | 6              | 1,39E+06                      | 8,98E+04          | 5,44E-06          | 6,46E+05       | 1,85E-07       |
|                     | 12             | 4,92E+04                      | 1,77E+04          | 4,76E-06          | 3,51E+04       | 8,14E-07       |

En la Tabla 9 se presentan los datos obtenidos a través de la simulación del circuito equivalente (ver Figura 5) utilizando el software Nova versión 2.1. Es evidente que tanto la

resistencia ( $R_{\text{layer}}$ ) como la pseudo capacitancia de la película ( $C_{\text{layer}}$ ) presenta una variación con el tiempo en cada uno de los lugares, mostrando un mayor valor de  $R_{\text{layer}}$  a los 6 meses de exposición, correspondiente al tiempo donde se presenta el mayor valor de magnitud de impedancia del cobre (resistencia de polarización), presentado en la columna 3 de la Tabla 9. Además, se observa valores ligeramente mayores de  $R_{\text{layer}}$  menores de  $C_{\text{layer}}$  para el sitio UAN en comparación con el sitio Mayor, indicando una afectación más alta en la placa en el sitio Mayor, debido a los valores ligeramente más altos de contaminantes asociados a su ubicación geográfica. Sin embargo, esto no significa que el material en el sitio UAN no se vea afectado, ya que también presenta valores significativos.

Después de los 6 meses, el orden de magnitud de resistencia y capacitancia en ambos sitios son similares y tienden a disminuir, lo que indica una velocidad de corrosión constante con el tiempo. Esto sugiere que la placa siempre se verá afectada después de los 6 meses, permitiendo la pérdida de material debido al material contaminante que reposa sobre la placa, lo que causa una afectación directa sobre la morfología de la placa.

#### **4.6 Comportamiento electroquímico del cobre en la atmósfera de Cartagena en relación con los parámetros ambientales de la ciudad y la velocidad de corrosión.**

Después de realizar un análisis comparativo con la información recopilada a lo largo de un año, de acuerdo con la norma ISO 9223, se puede afirmar que la ciudad de Cartagena presenta una categorización alta o muy alta en cuanto a la velocidad de corrosión, siendo clasificada como C4/C5 según la norma ISO 9223 del 2012. Esta clasificación se aplica a zonas tropicales o cercanas a zonas costeras, y se basa en los valores de tasa de corrosión medidos a lo largo de un año. En los dos sitios analizados, se encontraron valores aproximados entre 2,7  $\mu\text{m/año}$  (UAN, C4) y 3,1  $\mu\text{m/año}$  (Mayor, C5), los cuales, al compararlos con la norma ISO 9223, confirman la alta velocidad de corrosión.

Estos valores también se reflejan en la pérdida de masa, que oscila entre 30 g/m<sup>2</sup> en UAN y 35 g/m<sup>2</sup> en Mayor. Estos resultados confirman que a medida que el material esté más cerca de la zona costera, será más afectado debido a las condiciones meteorológicas y a la acumulación de cloruros y sulfatos en la superficie. Esta situación conlleva a una mayor presencia de material corrosivo y un aumento significativo en la velocidad de corrosión con el paso del tiempo.

#### 4.7 Pérdida de material hasta 10 años de exposición estimada mediante uso de función dosis respuesta

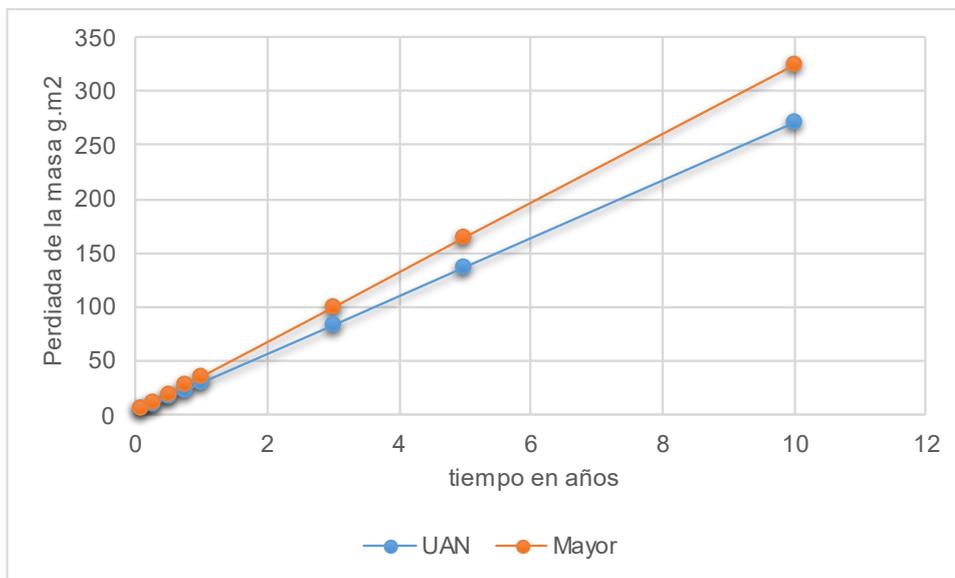


figura 20 pérdida de masa  $g.m^2$  respecto al tiempo en años.

La Figura 19 muestra la pérdida de masa estimada para el cobre expuesto en los sitios Mayor y UAN, revelando que durante los primeros 12 meses se observa la mayor variación en el aumento de pérdida de material, asociado a la formación inicial de los productos de corrosión, al estar la placa en presencia de cloruro y sulfato en el entorno urbano de la ciudad. Estos elementos representan agentes corrosivos que aceleran el deterioro de los materiales expuestos. Luego de un año de exposición, se observa un incremento casi continuo en la pérdida de material, tanto en UAN como en Mayor, indicando que la corrosión se presenta a una velocidad aprox. constante a tiempos de exposición entre 1 y 10 años. No obstante, es clara la menor velocidad de corrosión del cobre al ser expuesto en un sitio con menor nivel de contaminantes en el aire, especialmente de cloruros, es el caso del sitio UAN.

Para calcular la velocidad de corrosión, se utiliza la ecuación propuesta en la norma ISO 9223 del 2012, lo que permite estimar de manera más rápida el impacto de estos agentes corrosivos en los materiales estudiados.

Al comparar los datos recopilados con el documento de referencia sobre niveles de agentes contaminantes en Cartagena [33], se constata que la velocidad de corrosión experimenta un valor casi constante después de los primeros 6 meses, Este incremento sostenido conlleva una mayor degradación del material a lo largo del tiempo, lo cual representa un desafío significativo para la durabilidad de las estructuras urbanas.

Asimismo, al comparar los datos recopilados entre un estudio realizado en el año 2011 y la prueba actual, se observa un leve aumento en el nivel de corrosión. Este hallazgo subraya la persistente influencia negativa de los materiales y elementos contaminantes presentes en la ciudad de Cartagena sobre la integridad de las estructuras y materiales utilizados en su infraestructura.

## 5 Conclusiones

La velocidad de corrosión atmosférica del cobre en la ciudad está influenciada por las condiciones climáticas, especialmente la presencia de brisa que transporta cloruro de sodio desde el mar, y la presencia de dióxido de azufre de origen antropogénico. Estos factores contribuyen significativamente a la corrosión del metal. Se destaca una deposición de cloruros con valores de 53,1 y 56,3 mg/m<sup>2</sup>día en el aire, lo cual tiene una gran influencia en la velocidad de corrosión, con valores de 10,07  $\mu\text{m/año}$  y 2,42  $\mu\text{m/año}$ , indicando una alta velocidad de corrosión del cobre en la ciudad de Cartagena de Indias.

La morfología evidenciada a una masificación de 100X permitió visualizar el nivel de ataque superficial en el cobre expuesto en la ciudad de Cartagena de Indias, el cual es más alto en el sitio Mayor debido a su cercanía al mar, en comparación con el sitio UAN. Esto se atribuye a la mayor concentración de cloruros, lo que resulta en una afectación más elevada del material.

El cobre presenta un comportamiento capacitivo, en la ciudad de Cartagena de Indias, según lo evidenciado durante el primer año de exposición. El comportamiento a la corrosión está asociado principalmente a nivel de cloruros en el ambiente ya que se presenta una mayor resistencia de polarización en el sitio UAN, el cual presenta una deposición de cloruros menor en comparación al sitio Mayor

La velocidad de corrosión instantánea determinada para el cobre a partir de las curvas Tafel, presenta una ligera diferencia entre sitio UAN y sitio Mayor. En este caso se obtienen valores de  $V_{\text{corr}}$  de 27  $\mu\text{m/año}$  y 34  $\mu\text{m/año}$  para dichos sitios, respectivamente. Esto indica que la atmosfera en la ciudad corresponde a una categoría de muy alta corrosión.

Se determina que en la atmosfera de la ciudad de Cartagena corresponde a una categoría de alta de velocidad de corrosividad, siendo catalogada como C4/C5 de acuerdo con los lineamientos de la norma ISO 9223 del 2012. Los valores de tasa de corrosión y pérdida de masa indican una alta velocidad de corrosión, especialmente en zonas cercanas a la costa debido a las condiciones climáticas. Esto significa que los materiales expuestos en estas áreas estarán

más afectados por las variables climáticas como él se evidencio en el sitio mayor respecto al sitio UAN.

La pérdida de material se ve afectado de una forma casi constante en la atmosfera de la ciudad de Cartagena de Indias, lo que genera que la pérdida de masa o de espesor en el cobre corresponderá en proporción al tiempo de exposición. Lo anterior subraya la importancia de implementar medidas efectivas para mitigar los efectos corrosivos de estos agentes contaminantes en la infraestructura urbana, especialmente donde se implemente el uso de cobre. Así mismo se destaca la necesidad de llevar a cabo investigaciones a mayor tiempo, así como la implementación de estrategias para establecer el mantenimiento predictivo y preventivo, para garantizar la durabilidad y seguridad de las estructuras urbanas en entornos corrosivos.

## 6 Referencias

- 2.-M. v. B. C. p. 1. Dep. Ing. Mater. Degrad. y Durabilidad Cent. Nac. Investig. Met. Avda. Gregor. del Amo 8, «corrosión atmosférica de metales, efecto de parámetros meteorológicos y de contaminación,» p. 16.
- 1] [ B. C. a. D. D. E. L. A. F. Y. M. Morcillo, «“Cerámica y Vidrio Corrosión atmosférica de metales en condiciones climáticas extremas,» 2000, pp. 329-332.
- .scai.uma, «scai.uma.es,» [En línea]. Available:
- 3] <http://www.scai.uma.es/areas/micr/sem/sem.html>.
- M. Morcillo, «Predicción a corto y largo plazo de la corrosión atmosférica de metales,» de *vol. 34*, 1998..
- 4]
- G. Instruments, «basics-of-electrochemical,» 2023. [En línea]. Available:
- 5] <https://www.gamry.com/application-notes/EIS/basics-of-electrochemical-impedance-spectroscopy>. [Último acceso: marzo 2023].
- G. Instruments, «Conceptos básicos de la espectroscopia de impedancia electroquímica,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.gamry.com/application-notes/EIS/basics-of-electrochemical-impedance-spectroscopy>. [Último acceso: marzo 2023].
- 6]
- L. U. P. d. C. -. BarcelonaTech, «taulaperiodica.webs.upc.edu,» La Universitat Politècnica de Catalunya - BarcelonaTech, [En línea]. Available: [https://taulaperiodica.webs.upc.edu/castella/11\\_Columna11/Coure.html](https://taulaperiodica.webs.upc.edu/castella/11_Columna11/Coure.html). [Último acceso: febrero 2023].
- 7]
- A. y. Khaled, Amin y Khaled, ; Davis, 2001, , 2010.
- 8]
- M. A. J. f. & R. R. H. Cano, «Niveles de contaminación de la ciudad de cartagena de indias y su impacto en la degradación de los monumentos arquitectónico,» cartagena de Indias .
- 9]

[En línea]. Available: [www.scai.uma.es/areas/micr/sem/sem.html](http://www.scai.uma.es/areas/micr/sem/sem.html). [Último  
10] acceso: 3 agosto 2020].

«losmejoresdestina.com,» [En línea]. Available:  
11] [https://www.losmejoresdestinos.com/destinos/cartagena/cartagena\\_mapa.htm](https://www.losmejoresdestinos.com/destinos/cartagena/cartagena_mapa.htm).

google, «google maps,» 2023. [En línea]. Available:  
12] <https://www.google.com/maps/dir/Institucion+Universitaria+Mayor+De+Cartagena/Universidad+Antonio+Nari%C3%B1o+%E2%80%94+Sede+Cartagena,+Dg.+22+%2364+A-+%23+48,+Loma+de+Mari%C3%B3n,+https://www.google.com/maps/dir/Institucion+Universitaria+Mayor+De+Cartagen>. [Último acceso: 20 JUNIO 2023].

P. Gonzalez, «Estudio de la Modelacion Matematica de la corrosion atmosferica  
13] del cobre en la provincia de las palmas, Caracterizacion de la velocidad de corrosion mediante tecnicas electroquimica,» Palmas , 2009.

I. 9223, «ISO,» MARZO 2012. [En línea]. Available:  
14] <https://www.iso.org/standard/53499.html>. [Último acceso: Diciembre 2022].

[www.tut tiempo.net](http://www.tut tiempo.net), «clima de cartagena/ rafael nuñez,» 2016. [En línea].  
15] Available: <https://www.tut tiempo.net/clima/2016/ws-800220.html>. [Último acceso: 18 diciembre 2023].

M. D. A. Y. D. SOTENIBLE, «" por lo cual se adopta la norma de calidad del  
16] aire ambiente y se dictan otras disposiciones",» 2017.

«lenntech,» [En línea]. Available:  
17] [www.lenntech.es/periodica/elementos/cu.htm#ixzz8H1UEpplV](http://www.lenntech.es/periodica/elementos/cu.htm#ixzz8H1UEpplV).

Médium, «[medium.com/@biomtis.peru/qu%C3%A9-es-la-espectroscopia-de-impedancia-electroqu%C3%ADmica-eb245997c818](https://medium.com/@biomtis.peru/qu%C3%A9-es-la-espectroscopia-de-impedancia-electroqu%C3%ADmica-eb245997c818),» 2021. [En línea].  
18]

M. Á. B. Fuentes y J. C. D. Colomba, Comportamiento a la corrosión  
19] atmosférica del aluminio 6061 expuesto en tres sitios de cartagena de indias, Bogota: Universidad antonio nariño, 2020.

20] M. A. B.V., «Espectrocopia de Impedancia electroquímica parte 1 Principios Basicos,» 2019.

21] R. M. Saavedra, SIMULACIÓN MEDIANTE CIRCUITOS EQUIVALENTES DE, UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID: Escuela Politécnica Superior Dpto. de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Química, Marzo de 2014.

22] M. A. B.V., «Espectrocopia de impedancia electroquímica Parte 3 Analisis de datos,» 2019.

23] M. A. B.V., «Corrosion parte 1 - concepto básico,» 2018.

24] M. A. B.V., «Espectrocopia de impedancia electroquímica parte 4 Modelo de circuito equivalente,» 2019.

25] M. A. B.V., «Espectrocopia de Impedancia electroquímica Parte 6 Medicion de Señales sin procesos en EIS,» 2019.

26] 2. Y.-w. L. H.-t. Z. C. P. Z.-y. W. Xiao LU1, «Corrosion behavior of copper in,» *science direct*, vol. 19, nº 12, p. 10, 2020.

27] S. E. D. BARRIDO, «SCAIMICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO,» 2023. [En línea]. Available: <http://www.scai.uma.es/areas/micr/sem/sem.html>. [Último acceso: 15 septiembre 2023].

28] A. S. García, MONTAJE Y PUESTA A PUNTO DE UN POTENCIOSTATO COMERCIAL PARA LLEVAR A CABO MEDIDAS DE CORROSIÓN ELECTROQUÍMICA, Madrid: UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID, ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR, Departamento de Física.

29] A. S. Castelló, Puesta a punto de un equipo de medida de la velocidad de corrosion y realizacion de experimentos, zaragoza-españa, Universidad de Zaragoza.

30] M. Morcillo, Prediccion a corto y largo plazo de la corrosion atmosferica de matalas, vol. 34, 1998.

- 31] A. Restrepo, «Análisis de la composición química del cobre,» 2017.
- s. N. 2.1, software NOVA 2.1, 2023.
- 32] H. Cano, J. F. R. Rojas, M. E. Agamez, L. d. I. Hoz y L. Agamez, «Niveles de contaminantes de la ciudad de Cartagena de Indias y su impacto en la degradación de los monumentos arquitectónicos en la ciudad de Cartagena de Indias,» *universidad antonio nariño*, vol. 1, p. 5, 2011.
- 33] C. H, «Impacto Socioeconómico de la corrosión del aire en el patrimonio Arquitectónico en la ciudad de Cartagena de Indias,» Cartagena de Indias .
- 34] D. d. L. F. y. M. M. B. chico, *Corrosión Atmosférica de metales en condiciones climáticas extremas*, Avda. Gregorio del Amo, 8 28040, 2000.
- 35] 1, 2023. [En línea]. Available: [www.iso.org/standard/53499.html](http://www.iso.org/standard/53499.html).
- 36]