



**Comportamiento a la corrosión atmosférica del aluminio 6061 expuesto en tres
sitios de Cartagena de Indias**

**Miguel Ángel Bastidas Fuentes
Juan Camilo Duque Colomba**

**Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica
Bogotá, Colombia
2020**



Comportamiento a la corrosión atmosférica del aluminio 6061 expuesto en tres sitios de Cartagena de Indias

**Miguel Ángel Bastidas Fuentes
Juan Camilo Duque Colomba**

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

Director:

Ph.D. John Rios Rojas

Coasesora:

Heidys Patricia Cano

Deterioro de materiales

Grupo de Research in Energy and materials (REM)

**Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica
Bogota DC, Colombia
2020**

1. Resumen

El aluminio 6061 es una aleación que actualmente presenta una gran variedad de aplicaciones debido a sus características como son su baja densidad en relación con otros materiales metálicos, dúctil, no generar chispa y nula toxicidad; sin embargo, la aleación puede presentar afectaciones debido a corrosión atmosférica cuando es empleado en aplicaciones en zonas costeras. Por tal motivo, este estudio se enfoca en la caracterización del comportamiento a la corrosión de la aleación de aluminio 6061 en la ciudad de Cartagena de Indias.

Se analizan las probetas de la aleación expuestas en tres sitios estratégicos (zona amurallada, zona industrial de mamonal y zona comercial/urbana, al interior de la ciudad) para poder evaluar su comportamiento en la ciudad. Las muestras consideradas en el proyecto corresponden a probetas expuestas en cada sitio especificado durante 1, 6 y 12 meses. La caracterización del comportamiento de esta aleación de aluminio se realizará a partir de la técnica electroquímica de espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS), para cada uno de los tiempos de exposición indicados, llevando a cabo análisis de los resultados de impedancia y simulación mediante circuito eléctrico equivalente, y la observación de la morfología del producto de corrosión formado se llevará a cabo mediante microscopía electrónica de barrido a muestras luego de un año de exposición.

Palabras clave: Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS), Microscopía electrónica de barrido (SEM), Electroquímica, velocidad de corrosión, Circuito eléctrico equivalente.

2. Abstract

Aluminum 6061 is an alloy that currently has a wide variety of applications due to its characteristics such as its low density in relation to other metallic materials, ductile, does not generate spark and no toxicity; However, the Alloy can be affected by atmospheric corrosion when used in coastal applications. For this reason, this study focuses on the characterization of the corrosion behavior of the 6061 aluminum alloy in the city of Cartagena de Indias.

The specimens of the alloy exposed in three strategic places are analyzed (walled area, Mamonal industrial area and commercial / urban area, inside the city) will be analyzed in order to evaluate their behavior in the city. The samples considered in the project correspond to probes exposed at each specified site for 1, 6 and 12 months. The characterization of the behavior of this aluminum alloy will be carried out from the electrochemical technique of electrochemical impedance spectroscopy (EIS), for each of the indicated exposure times, carrying out an analysis of the impedance results and simulation by means of an electrical circuit. equivalent, and the observation of the morphology of the corrosion product formed will be carried out by scanning electron microscopy using samples after one year of exposure.

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

3. Contenido

	Pág.
Resumen	3
Abstract	4
Contenido	5
Lista de figuras	7
Lista de tablas	9
Introducción	1
Capítulo 1: Descripción General	3
Descripción del problema	3
Justificación	3
Objetivos	4
Objetivo General	4
Objetivos específicos	4
Alcancé	5
Capítulo 2: Marco Teórico	6
Información general de la ciudad de Cartagena de indias	6
Información meteorológica general en la ciudad de Cartagena	6
Información de contaminantes en la ciudad de Cartagena	6
Importancia del puerto de Cartagena en el desarrollo económico de la ciudad y el país.	8
Generalidades del aluminio	8
Generalidades de la aleación de aluminio 6061	9
Composición química de la aleación de aluminio 6061	10
Propiedades físicas, mecánicas y térmicas de la aleación de aluminio 6061	10
Influencia del tratamiento térmico en la resistencia a la corrosión	11
Velocidad de corrosión.	11
Estimación de la velocidad de corrosión por función dosis-respuesta.	11
Norma ISO 9223 del 2012.	12

Determinación matemática de la velocidad de corrosión por decapado químico.	14
Microscopía electrónica de barrido (MEB)	15
Procedimiento de análisis EIS	15
Configuración instrumental	18
Capítulo 3: metodología	23
Datos meteorológicos y de contaminantes	23
Estimación de la velocidad de corrosión	24
Recopilación y análisis de los datos de velocidad de corrosión	24
Procedimiento de decapado químico para determinar velocidad de corrosión.	24
Preparación de especímenes estándar (norma ISO 9226 del 2012)	25
Exposición de las muestras estándar	25
Discusión de resultados	28
Estimación de la velocidad de corrosión por función dosis-respuesta de Kucera.	35
Estimación de la velocidad de corrosión por norma ISO 9223 del 2012	36
Velocidad de corrosión por decapado químico.	37
Circuitos para elaborar los ajustes de espectros de EIS en software Nova (versión 1.11)	44
Ajustes elaborados por medio de circuito equivalente en software nova para UTB.	45
Ajustes elaborados por medio de circuito equivalente en software nova para Cotecmar.	48
Ajustes elaborados por medio de circuito equivalente en software nova para Colegio mayor de Bolivar.	50
Resistencia de polarización	52
Comportamiento de las resistencias del circuito equivalente respecto al tiempo de exposición.	54
Comportamiento de los elementos de fase constante del circuito equivalente respecto al tiempo de exposición.	57
Conclusiones	61
Referencias	63

4. Lista de figuras

Figura 1: Comportamiento fasorial de corriente y voltaje con ángulo de desfase con el voltaje como referencia.	15
Figura 2: Comportamiento de las ecuaciones 3 y 4 con voltaje instantáneo de referencia y corriente instantánea con ángulo de desfase.	16
Figura 3: Diagrama de Nyquist.	17
Figura 4: Diagrama de Bode.	17
Figura 5: configuraciones de celda de electrodos a) configuración de dos electrodos b) configuración de tres electrodos c) configuración de cuatro electrodos.	18
Figura 6: Circuitos equivalentes para los ajustes de EIS en zonas costeras.	22
Figura 7: Datos meteorológicos en Cartagena.	28
Figura 8: Ubicación de exposición de las muestras	29
Figura 9: Promedio de contaminantes en el aire 2010.	31
Figura 10: Pérdida de masa de las muestras en los tres lugares de exposición a 1, 6 y 12 meses.	37
Figura 11: Velocidad de corrosión calculada por decaído químico para 1, 6 y 12 meses.	38
Figura 12: Imágenes capturadas por medio de MEB para UTB (universidad tecnológica de Bolívar) a los 12 meses de exposición.	39
Figura 13: Imágenes capturadas por medio de MEB para colegio mayor de Bolívar a los 12 meses de exposición.	40
Figura 14: Imágenes capturadas por medio de MEB para Cotecmar a los 12 meses de exposición.	41
Figura 15: Circuitos empleados para ajustar los espectros de EIS en software nova.	42
Figura 16: Ajustes EIS UTB	43
Figura 17: Ajustes EIS COTEMAR	45
Figura 18: Ajustes EIS Colegio mayor de Bolivar	47
Figura 19: Resistencias de polarización en los tres sitios de exposición.	49
Figura 20: Resistencia de transferencia de carga en los tres sitios de exposición.	51
Figura 21: Resistencia de la capa nativa en los tres sitios de exposición.	52
Figura 22: Resistencia de producto de corrosión formado en los tres sitios de exposición.	53

- Figura 23:** Elemento de fase constante de transferencia de carga para los tres sitios de exposición. 55
- Figura 24:** Elemento de fase constante de la capa nativa para los tres sitios de exposición. 56
- Figura 25:** Elemento de fase constante de la capa de producto de corrosión formado, para los tres sitios de exposición. 57

5. Lista de tablas

Tabla 1: Niveles máximos permisibles de concentración de contaminantes	7
Tabla 2: Propiedades del aluminio puro (1050 Al 99,5% a 20°C)	9
Tabla 3: Composición química de la aleación de aluminio 6061.	10
Tabla 4: Propiedades mecánicas y térmicas de la aleación de aluminio 6061	11
Tabla 5: Categorías de corrosividad atmosférica según Iso 9223 del 2012	12
Tabla 6: Clasificación de categorías de corrosividad según velocidad de corrosión en ISO 9223 del 2012.	13
Tabla 7: Elementos comunes de circuito equivalente.	19
Tabla 8: Datos de contaminantes del aire en Cartagena 2010	31
Tabla 9: Cloruros en sitios de exposición de las muestras	33
Tabla 10: Concentración de PM10 2017.	34
Tabla 11: Valor de velocidad de corrosión estimado por función dosis-respuesta.	35
Tabla 12: Datos meteorológicos y de contaminantes para función dosis respuesta.	35
Tabla 13: Valor de velocidad de corrosión estimado según ISO 9223 del 2012.	36
Tabla 14: Datos meteorológicos y de contaminantes para función dosis respuesta de 9223 del 2012.	37
Tabla 15: Velocidades de corrosión y pérdidas de masa.	37
Tabla 16: Resistencias de polarización en los tres sitios de exposición.	51

6. Introducción

Cartagena es una ciudad portuaria sobre el mar caribe, con el clima característico de un ambiente costero, con una temperatura promedio de 27°C y humedad relativa que oscila el 84% (Ideam, 2020). Debido al puerto con que cuenta esta ciudad, es un pilar muy importante sobre el cual recae la mayoría de la economía del lugar y una buena parte de la del país (Universidad tecnológica de bolívar, 2018). Teniendo en cuenta que Cartagena económicamente depende en mayor parte de su industria y zona portuaria, se han venido creando programas de desarrollo para la modificación de estas mismas (Cartagena competitiva y compatible con el clima, 2018), con el objetivo de que estas plataformas puedan tener un mejor diseño que incremente su vida útil y operación, en especial los materiales de construcción al ser sometidos a las condiciones climáticas del lugar.

En China se realizaron algunas investigaciones acerca del comportamiento de la corrosión del aluminio puro expuesto atmosféricamente en la última década (Yanjie, 2013)(Liu, 2014), para evaluar este comportamiento realizaron análisis con ayuda de diferentes procedimientos y técnicas, tales como la microscopía electrónica de barrido (MEB), la cual da como resultado una imagen a diferentes escalas que permite visualizar la morfología del producto de corrosión formado. Pérdida de masa, velocidad de corrosión y por último, circuito equivalente con ayuda de software especializado para realizar los ajustes de los diagramas en frecuencia (Nyquist y Bode) generados por medio de la espectroscopia electrónica de barrido (EIS). Al momento de analizar los resultados finales obtenidos por medio de las técnicas y procedimientos empleados, finalmente se concluye que los contaminantes atmosféricos, tales como los cloruros (Cl-) y óxidos de azufre (SO₂) presentes en el aire tienen gran influencia en el comportamiento de la corrosión del aluminio, siendo los principales causantes del deterioro del material en estudio.

La aleación del aluminio 6061 tiene como aleantes principales magnesio y silicio, y en cantidades menores hierro, cobre, manganeso, cromo, zinc y titanio. Esta aleación presenta buenas propiedades mecánicas y de resistencia a la corrosión bajo condiciones ambientales exigentes(Aguirre, 2006), debido a esto son muchas las áreas donde es conveniente su uso, es el caso de la industria naval: por lo tanto, se vuelve una buena opción a la hora de ser seleccionado en aplicaciones a la intemperie para algunas zonas costeras (Para una cartagena sostenible y competitiva, 2016)(Alacer Mas, 2020).

La aleación de aluminio 6061 presenta la formación de productos de corrosión, independientemente de las buenas propiedades de resistencia química que posee al ser

expuesto a la atmósfera (Aguirre, 2006), por lo cual es importante estudiar el comportamiento del material a la atmósfera en tres sitios de cartagena de indias (zona amurallada, zona industrial e interior de la ciudad) durante un año de exposición, debido a que la aleación puede mostrar diferencias en su comportamiento a la corrosión en función del tiempo y de las condiciones ambientales en cada sitio.

La espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) es una técnica muy importante a la hora de conocer cómo afecta la corrosión a un material, aunque no la única, ya que es posible hallar la impedancia del material a diferentes frecuencias en un instante específico de tiempo y con ello determinar su comportamiento al ambiente específico, lo cual puede ser complementado realizando una simulación del diagrama de impedancia mediante un modelo de circuito equivalente para llevar a cabo una extracción de parámetros a partir del mismo (Aguirre, 2006). La microscopía electrónica de barrido (MEB) permite observar las características superficiales del material, permitiendo identificar la morfología del producto de corrosión formado (Scai, 2020). Debido a que esta técnica (MEB) permite hacer un análisis de tipo cualitativo, puede apoyar los resultados obtenidos a partir de EIS.

El comportamiento de la aleación de aluminio 6061 se estudió por medio del procedimiento de decapado químico para determinar la velocidad de corrosión, también se hace uso de las dos técnicas mencionadas en el anterior párrafo (EIS y MEB), con la primera mencionada (EIS) se busca evaluar el comportamiento de la aleación en la ciudad de Cartagena de Indias interpretando los resultados de los elementos de circuito equivalente obtenidos al momento de realizar los ajustes de los espectros de impedancia electroquímica por medio del software nova 1.11 y con la segunda (MEB) se busca encontrar la morfología del producto de corrosión formado en las muestras para un año de exposición.

1. Capítulo 1: Descripción General

1.1. Descripción del problema

Actualmente la aleación de aluminio 6061 es de gran utilidad en zonas costeras, como es el caso de Cartagena de Indias, ya que este material se implementa en la industria naval e inmobiliaria (Jimenez, 2016), a su vez cuenta con buenas propiedades mecánicas y de resistencia a la corrosión (Aguirre, 2006), lo cual es muy importante a la hora de utilizarse en aplicaciones navales.

Independientemente de las buenas propiedades con las que cuenta el material, este presenta muestras de corrosión al pasar el tiempo luego de interactuar con exigentes condiciones ambientales costeras, la pregunta central para dar solución a esto es: ¿cuál es el comportamiento de la aleación de aluminio 6061 al interactuar con la atmósfera de cartagena de indias luego de un año de exposición?, teniendo en cuenta que las probetas fueron ubicadas en tres sitios específicos en la ciudad, mencionados con anterioridad en este documento, es importante indagar cómo influye la ubicación en el desempeño de la aleación de aluminio, y con esto, hacer prevenciones adecuadas a la hora de trabajar con este material, puesto que el no tener en cuenta como es su comportamiento podrá incrementar las inversiones económicas a la hora de realizar el respectivo mantenimiento e intervenciones a las zonas afectadas.

Por tal motivo se busca dar a conocer de manera concisa y clara como es el comportamiento que puede presentar este material a partir de la espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS).

1.2. Justificación

En la última década el avance en el área naval, área inmobiliaria, vehículos terrestres, motores, componentes electrónicos, entre otras aplicaciones, han tenido grandes avances (Para una cartagena sostenible y competitiva, 2016)(AMCHAM COLOMBIA, 2019), y a su vez la implementación de la aleación de aluminio 6061 no se hace esperar por sus excelentes características y aplicaciones (Aguirre, 2006).

Si indagamos, actualmente no hay estudios de gran relevancia sobre el comportamiento a la exposición atmosférica de la aleación de aluminio 6061 luego de un año de exposición en zonas costeras aledañas al mar caribe como lo es Cartagena de Indias (Shetty,

2015)(Guang, 2018), lo cual es de suma importancia, pues sus aplicaciones son tan amplias que cada vez el uso de este material en las diversas áreas es mayor, por lo tanto, el propósito de este estudio es conocer más a fondo el comportamiento de esta aleación ante la exposición atmosférica por medio de la caracterización del mismo, y así, poder identificar de forma precisa el tipo de morfologías del producto de corrosión formado que presenta la superficie del material, luego de un año de exposición en los tres sitios especificados dentro de la ciudad de Cartagena de Indias a partir de microscopía electrónica de barrido.

Por otra parte, al evaluar el comportamientos que puede presentar la aleación 6061 mediante impedancia electroquímica (EIS) se podría dar una idea aproximada tanto para la vida útil del material y su desempeño, para con ello generar recomendaciones técnicas al ser usado en alguna condición similar a la estudiada en este proyecto.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Caracterizar el comportamiento de la aleación de aluminio 6061 a la atmósfera de Cartagena de Indias en tres sitios de la ciudad durante un año de exposición.

1.3.2. Objetivos específicos

- Realizar búsqueda de información meteorológica y contaminantes atmosféricos reportados en la ciudad de Cartagena.
- Determinar la velocidad de corrosión de la aleación de aluminio 6061 durante un año de exposición en la ciudad de Cartagena de Indias
- Identificar la morfología del producto de corrosión formado en la superficie de la aleación de aluminio 6061 mediante microscopía electrónica de barrido.
- Analizar los espectros de impedancia electroquímica obtenidos para la aleación de aluminio 6061, en tres sitios de la ciudad de Cartagena durante un año de exposición.
- Simular los resultados de impedancia electroquímica mediante el método de circuito eléctrico equivalente empleando el software nova.
- Evaluar el comportamiento del material en relación con la morfología del producto formado y los resultados generados por la simulación de las gráficas de EIS

1.4. Alcance

El alcance del proyecto será llevar a cabo una evaluación del comportamiento a la corrosión sobre la aleación de aluminio 6061 al ser expuesto en tres sitios diferentes de la ciudad de Cartagena de Indias (zona amurallada, zona industrial e interior de la ciudad), a partir de la espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS). Esto se lleva a cabo a tiempos de exposición de 1, 6 y 12 meses, logrando dar a conocer a través de un documento de forma clara y concisa el análisis a partir de un circuito equivalente con EIS que brinde una adecuada interpretación de los resultados obtenidos.

2. Capítulo 2: Marco Teórico

2.1. Información general de la ciudad de Cartagena de Indias

2.1.1. Información meteorológica general en la ciudad de Cartagena

De acuerdo a la información reportada por el Ideam, Cartagena presenta un clima cálido - seco. La temperatura de bulbo seco promedio de la última, para la ciudad de Cartagena de Indias, es aproximadamente de 28,4°C y presenta normalmente un valor promedio entre 27°C y 29°C. El primer trimestre del año presenta la temperatura más baja (aprox. 27° para los meses de Enero, febrero y marzo) y el periodo de mayor temperatura es a mitad de año con un valor aproximado de 28,8°C para los meses de mayo, junio y julio. La humedad relativa es alta debido a que la ciudad se encuentra sobre el mar Caribe, con un valor promedio de aproximadamente 85%, teniendo nuevamente los meses del primer trimestre del año los valores más bajos (cerca a 82%), y por último, se tiene que el mes de mayor humedad relativa del año es octubre alcanzando valores de 86,6%. En cuanto a los valores de precipitación se conoce que el año de menor lluvia es el 2015 y el de mayor lluvia es el 2026, en cuanto a un promedio general se sabe que la precipitación mensual acumulada es de 100 mm aproximadamente por año, teniendo el primer trimestre de valores casi nulos de lluvia, y el mes de octubre como el de mayor precipitación, superando por más de 200 mm el promedio de precipitación mensual (Ideam, 2020).

2.1.2. Información de contaminantes en la ciudad de Cartagena

El análisis desarrollado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en Colombia, indica que la contaminación atmosférica es uno de los factores más preocupantes ya que generan grandes impactos sobre la sociedad en términos de salud, contaminación de agua, desastres naturales y los costos sociales, es por tal motivo que se ha designado una normatividad compuesta por una serie de resoluciones y decretos con el fin de delimitar y controlar el nivel de contaminación en sus diferentes campos para mejorar la calidad de vida y evitar el aumento de los factores antes mencionados, la **resolución 610 de 2010** que rige cuales son los niveles máximos de contaminantes en el aire, esta se define como la

resolución para la calidad del aire, la cual es base para comparar, analizar y tomar decisiones respecto a las características que presente el aire en las diferentes zonas del territorio nacional de Colombia (Minambiente, 2020).

Tabla 1: Niveles máximos permisibles de concentración de contaminantes

Contaminante	Nivel Máximo Permissible ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Tiempo de Exposición
PST	100	Anual
	300	24 horas
PM10	50	Anual
	100	24 horas
PM2.5	25	Anual
	50	24 horas
SO ₂	80	Anual
	250	24 horas
	750	3 horas
NO ₂	100	Anual
	150	24 horas
	200	1 hora
O ₃	80	8 horas
	120	1 hora
CO	10.000	8 horas
	40.000	1 hora

Fuente: (Minambiente, 2020).

La definición de algunos contaminantes se indica a continuación.

PM10: hace referencia a aquellas partículas contaminantes circundantes en el medio ambiente que tengan una magnitud menor a 10 μm en su tamaño (generadas a partir de erupciones, quemas forestales, construcciones civiles, labores agrícolas, entre otras), al ser un material tan pequeño logra filtrarse muy fácilmente (Caballero, Valencia & Catacolí, 2018).

SO₂: El dióxido de azufre es un gas contaminante que se genera principalmente por la quema de combustibles fósiles como lo son el carbón, petróleo y erupciones volcánicas. el dióxido de azufre normalmente reacciona con vapor de agua y genera ácido sulfuroso (H₂SO₃) y es quien puede llegar a producir lluvia ácida la cual es una de las principales causantes de las erosiones y aumentos de corrosión en estructuras de acero, aluminio, estatuas entre otras, por otra parte este dióxido de azufre también es quien da inicio al sulfato amónico, quien hace que aumente los niveles de PM10 (Ideam, 2020)

NO₂: El dióxido de nitrógeno es generado a partir de las partículas de nitrógeno N₂ y O₂ en el ambiente, estas suelen reaccionar químicamente a altas temperaturas, es decir por encima de 1200°C los cuales pueden producirse por tormentas eléctricas, otra forma de producirse es por medio de motores de combustión interna. el dióxido de carbono es un componente que se oxida rápidamente y genera ácido nítrico NO₃ el cual reacciona fácilmente con el vapor de agua, reacción que es precursora para generar lluvia ácida, la cual tiene grandes efectos de corrosión y erosión sobre los materiales como lo es el aluminio que estén expuestos a la intemperie (CeMCAQ, 2020).

2.1.3. Importancia del puerto de Cartagena en el desarrollo económico de la ciudad y el país.

La ciudad de cartagena de indias depende de su turismo, comercio, zona industrial y zona portuaria, esta última es un pilar importante tanto para la economía de la ciudad como del país.

Si se observa desde una forma más detallada el transporte de carga pesada, que es una extensión portuaria, define en Colombia aproximadamente entre el 6% y el 12% PIB, en un rango de tiempo entre el año 2000 y 2015 el comercio total del país aumentó desde el 32,6% hasta el 39%, respecto a importaciones aumentaron del 17% al 24% del PIB, y de acuerdo a exportaciones se pasó del 16% a 14,7% (Universidad tecnológica de bolívar, 2018).

Debido a la importancia del puerto expuesta anteriormente se han venido desarrollando programas para la modificación estructural tanto de la zona portuaria como de la zona industrial, con el objetivo de que estas puedan tener un mejor diseño, teniendo en cuenta objetivos que ayuden a mejorar la vida útil y capacidades de operación en el momento que los materiales de construcción se vean sometidos a las condiciones climáticas del lugar (Cartagena competitiva y compatible con el clima, 2018).

2.2. Generalidades del aluminio

El aluminio es un material que se encuentra con mayor abundancia en la tierra luego del silicio y el oxígeno, este elemento presenta buenas características para su empleo ya que es ligero, resistente mecánicamente y tiene buena resistencia a la corrosión, es por esto que es de gran utilidad en ambientes que presentan agresividad. El material cuenta con propiedades como elevada maleabilidad, alta conductividad eléctrica y térmica. Aunque el límite elástico del aluminio es por lo general menor al del acero, se compensa esta desventaja aumentando la sección transversal para una mejor resistencia (Gasparini, s.f.).

A continuación se muestra la serie de aluminio puro en comparación con la que será trabajada en el transcurso del proyecto.

SERIE 1000: Se define como la serie de aluminio más puros, ya que cuentan con más de 99% en porcentaje de aluminio, lo que conlleva a que no sean tratables térmicamente (ESAB 2020). Estos cuentan con una resistencia a la corrosión excelente.

SERIE 6000: Son aleaciones de aluminio con Silicio-magnesio, después que se ve sometido a sus tratamientos térmicos (para la serie 6000 si se pueden realizar tratamientos térmicos, según ESAB 2020) tienden a desarrollar características mecánicas intermedias. Tienen mayor vulnerabilidad de resistencia a la corrosión en comparación con la serie 1000, pero aun así, no deja de ser buena.

Tabla 2: Propiedades del aluminio puro (1050 Al 99,5% a 20°C)

Estado	Espesor mm	Características a la tracción					Dureza	
		Carga de rotura Rm. N/mm ²	Límite elástico Rp 0,2. N/mm ²	Alargamiento A 5,65%	Límite a la fatiga N/mm ²	Resistencia a la cizalladura τ N/mm ²	Brinell (HB)	Vickers
F	3,2 < e < 150	65		20			20	
0-H111	0,35 < e < 12	65-95	20	42	50	60	21	20
H14	0,35 < e < 12	100-140	105	10	70	70	35	36
H24	0,35 < e < 6	100-140	105	10	70	70	35	36
H16	0,35 < e < 3,2	120-160	120	7			39	
H26	0,35 < e < 3,2	120-160	120	7			39	
H18	0,35 < e < 3,2	150	140	6	100	85	43	44

Módulo elástico N/mm ²	Peso específico g/cm ³	Intervalo de fusión °C	Coefficiente de dilatación lineal 1/10 ⁶ K	Conductividad térmica W/m K	Resistividad eléctrica a 20°C - $\mu\Omega$ cm	Conductividad eléctrica % IACS	Potencial de disolución V
69,000	2,70	646-657	23,5	229	2,9	59,5	-0,84

Fuente: (Alacer Mas, 2020)

Cabe resaltar que para la **Tabla 2** el estado significa el tratamiento de temple del material según la norma ASM internacional de 1990. Para el aluminio puro 1050, F indica que no se ve sometido a ningún tratamiento térmico y H es endurecimiento por deformación. Para el proyecto, T4 y T6 son tratamientos térmicos por solución caliente y envejecido natural y artificial respectivamente.

2.3. Generalidades de la aleación de aluminio 6061

La aleación de aluminio 6061, se conoce como una aleación silicio-magnesio que fue creada en 1935, se caracteriza por ser un material que se utiliza para aplicaciones de tipo estructural, acabados de yates, tuberías y productos de protección a elementos eléctricos, como lo son las tapas de algunos motores. Esta aleación cuenta con buena ductilidad, conformabilidad y maquinabilidad.

Teniendo en cuenta que se trata de una aleación de resistencia media-alta cuenta con propiedades de buena resistencia a la corrosión, esto es debido a que el mismo aluminio genera una película de protección de óxido conocida como alúmina (Al_2O_3) que empieza a formarse cuando el aluminio entra en contacto con factores ambientales como el oxígeno,

agua, etc y alcanza espesores de aproximadamente los 100 amstrongs (Alu-stock, 2020). Cabe resaltar que las resistencias (mecánica y de corrosión) tienden a ser mayores cuando se ven sometidas al tratamiento de temple (Gabrian, 2016).

2.3.1. Composición química de la aleación de aluminio 6061

La aleación de aluminio 6061 contiene aluminio puro en una proporción de 95,85% y 98,56%, el resto es una combinación de otros elementos, algunos como el silicio que ayuda a disminuir la temperatura de fusión de la aleación y el magnesio que da una mejor resistencia.

Tabla 3: Composición química de la aleación de aluminio 6061.

Elemento	Porcentaje minimo (%)	Porcentaje maximo (%)
Magnesio	0,8	1,2
Silicio	0,4	0,8
Hierro	-	0,7
Cobre	0,15	0,4
Mangananeso	-	0,15
Cromo	0,4	0,35
Zin	-	0,25
Titanio	-	0,15
Otros	-	0,05 cada uno, 0,15 en total

Fuente: (Gabrian, 2016)

2.3.2. Propiedades físicas, mecánicas y térmicas de la aleación de aluminio 6061

El aluminio 6061 se da con ayuda de una solución caliente y se envejece de forma natural (T4) y de forma artificial para poder obtener su mayor resistencia (T6), ambos cuentan con una densidad de 2,7g/cc.

Debido a que las propiedades mecánicas y térmicas cambian de acuerdo al tratamiento térmico al cual fue sometido la aleación, a continuación se muestran las propiedades mecánicas (esfuerzo último, límite de fluencia y módulo de elasticidad) y las propiedades térmicas (coeficiente de expansión térmica y conductividad térmica) (Gabrian, 2016).

Tabla 4: Propiedades mecánicas y térmicas de la aleación de aluminio 6061

Propiedades	6061-T4	6061-T6
Fuerza de tensión	241 MPa 35000 psi	310 MPa 45000 psi
Fuerza de producción	145 MPa 21000 psi	276 MPa 40000 psi
Modulo de elasticidad	68,9 GPa 10000 ksi	68,9 GPa 10000 ksi
Propiedades	6061-T4	6061-T6
Coefficiente de dilatación térmico (20 °C - 100°C)	23,6 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$ 13,1 $\mu\text{in}/\text{in}\cdot^{\circ}\text{F}$	23,6 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$ 167,0 $\mu\text{in}/\text{in}\cdot^{\circ}\text{F}$
Conductividad térmica	154,0 W/m-k 1070,0 BTU-in/hr/ft ² -°F	167,0 W/m-k 1071,0 BTU-in/hr/ft ² -°F

Fuente: (Gabrian, 2016)

En la **tabla 4** se puede observar claramente que de acuerdo al tratamiento térmico que se le brinda a la aleación de aluminio 6061-T6 (tratado por solución caliente y envejecido artificial), este genera una mayor resistencia mecánica, como se exponía anteriormente.

2.3.3. Influencia del tratamiento térmico en la resistencia a la corrosión

Como se mencionaba anteriormente en propiedades físicas, mecánicas y térmicas de la aleación de aluminio 6061, T4 y T6 (solución caliente y envejecido de forma natural y artificial, respectivamente) son tratamientos térmicos que se hacen con el objetivo de agregar ciertas propiedades mecánicas al elemento, en este caso en envejecimiento artificial al que se ve sometido la aleación de aluminio 6061-T6 conlleva a que desarrolle unas mejores propiedades de resistencia mecánica y a la corrosión (Gabrian, 2016).

La resistencia a la corrosión T6 es mayor debido al tratamiento térmico que se le realiza, debido a que si se cuenta con una mayor temperatura y tiempo de interrupción de mayor magnitud se logra una buena relación de propiedades de resistencia mecánica y a la corrosión, ya que esto conlleva a una alta densidad de precipitación de granos y precipitados distribuidos discontinuamente en los límites de los granos (Hai, Daozhao, Zhixiu y Ziqiao, 2009).

2.4. Velocidad de corrosión.

2.4.1. Estimación de la velocidad de corrosión por función dosis-respuesta.

Los compuestos de azufre y nitrógeno presentes en el aire resultan ser corrosivos para los materiales metálicos, por mucho tiempo se consideró al SO₂ como el agente más corrosivo: sin embargo, luego se determinó que este (SO₂) en presencia de otros contaminantes,

como pueden ser el NO₂ y O₃, generan un ataque mayor a los materiales. Cabe resaltar que otros agentes corrosivos pueden ser contaminantes secundarios y material particulado.

Las funciones dosis-respuesta generadas en el desarrollo de ICP (programa cooperativo internacional orientado a efectos dentro de la convención de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas sobre contaminación atmosférica transfronteriza de largo alcance)(Kucera, 2020) permiten hacer una estimación sobre la velocidad de corrosión de un metal al ser expuesto a la atmósfera bajo unas condiciones durante un periodo de tiempo, para hacer uso de esta función se requiere censar o solicitar a alguna institución nacional o local datos sobre determinados contaminantes y condiciones meteorológicas.

A partir de las ecuaciones **Ec.1** y **Ec.2** para el aluminio se puede estimar la pérdida de masa (**ML**). Se requiere tener información acerca de cloruros (**Cl** en mg/L) y sulfatos (**SO₂** en µg/(m³)) presentes en el aire, y en cuanto a datos meteorológicos se requiere conocer la temperatura (**T** en °C), humedad relativa (**Rh** en %) y precipitación (**Rain** en mm). También se debe contar con el tiempo de exposición (**t** en años) y se halla el valor de la función temperatura (**FAL**), finalmente con los datos mencionados anteriormente se obtiene la pérdida de masa (**ML** en g/(m²)) como una estimación del valor como se muestra en la ecuación 1 (Kucera, 2020).

$$ML = 0,0021[SO_2]^{0,23}Rh \cdot \exp\{F_{Al}(T)\}t^{1,2} + 0,000023 Rain[Cl^-]t \quad (\text{Ec. 1})$$

$$F_{Al} = -0,061(T - 10) \text{ para } T > 10^\circ C \quad (\text{Ec. 2})$$

Contando con la estimación de la pérdida de masa obtenida en base a la **ecuación 1 y 2**, con información del tiempo de exposición de las muestras se procede a hacer la estimación de la velocidad de corrosión (se logra dividiendo ML entre el tiempo de exposición en años, para el proyecto se estima a un año, por lo tanto, ML=Velocidad de corrosión).

2.4.2. Norma ISO 9223 del 2012.

Es una norma actualizada respecto a la ISO 9223 de 1992, da conocer que los metales cuando son expuestos atmosféricamente padecen de corrosión, generando un producto de corrosión formado debido a contaminantes del aire y otras partículas suspendidas en la atmósfera que se precipitan sobre el metal. Las categorías de corrosividad atmosférica, se pueden determinar luego de un año de exposición de la muestra, como tiempo determinado al igual que en la ISO 9226 del 2012.

Tabla 5: Categorías de corrosividad atmosférica según Iso 9223 del 2012

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

Fuente: (ISO 9223, 2012)

Se debe tener en cuenta que no es lo mismo la determinar la categoría de corrosividad que estimar la categoría de corrosividad, la primera se determina por la pérdida del producto de corrosión formado mientras que la otra se halla a partir de la función dosis-respuesta especificada en la ISO 9223 del 2012.

La **tabla 6** muestra la clasificación de categorías de corrosividad dependiendo de la velocidad de corrosión estándar, para esto, se recomienda exponer las muestras en un periodo del año atmosféricamente agresivo. La categoría Cx (extrema) se encuentra en los entornos marinos y/o industriales.

Tabla 6: Clasificación de categorías de corrosividad según velocidad de corrosión en ISO 9223 del 2012.

CATEGORIA DE CORROSIVIDAD	VELOCIDAD DE CORROSION DE LOS METALES				
	UNIDAD	ACERO AL CARBONO	ZINC	COBRE	ALUMINIO
C1	g/(m ² ·a)	$r_{\text{corr}} \leq 10$	$r_{\text{corr}} \leq 0,7$	$r_{\text{corr}} \leq 0,9$	Despreciable
	μm/a	$r_{\text{corr}} \leq 1,3$	$r_{\text{corr}} \leq 0,1$	$r_{\text{corr}} \leq 0,1$	—
C2	g/(m ² ·a)	$10 < r_{\text{corr}} \leq 200$	$0,7 < r_{\text{corr}} \leq 5$	$0,9 < r_{\text{corr}} \leq 5$	$r_{\text{corr}} \leq 0,6$
	μm/a	$1,3 < r_{\text{corr}} \leq 25$	$0,1 < r_{\text{corr}} \leq 0,7$	$0,1 < r_{\text{corr}} \leq 0,6$	—
C3	g/(m ² ·a)	$200 < r_{\text{corr}} \leq 400$	$5 < r_{\text{corr}} \leq 15$	$5 < r_{\text{corr}} \leq 12$	$0,6 < r_{\text{corr}} \leq 2$
	μm/a	$25 < r_{\text{corr}} \leq 50$	$0,7 < r_{\text{corr}} \leq 2,1$	$0,6 < r_{\text{corr}} \leq 1,3$	—
C4	g/(m ² ·a)	$400 < r_{\text{corr}} \leq 650$	$15 < r_{\text{corr}} \leq 30$	$12 < r_{\text{corr}} \leq 25$	$2 < r_{\text{corr}} \leq 5$
	μm/a	$50 < r_{\text{corr}} \leq 80$	$2,1 < r_{\text{corr}} \leq 4,2$	$1,3 < r_{\text{corr}} \leq 2,8$	—
C5	g/(m ² ·a)	$650 < r_{\text{corr}} \leq 1\ 500$	$30 < r_{\text{corr}} \leq 60$	$25 < r_{\text{corr}} \leq 50$	$5 < r_{\text{corr}} \leq 10$
	μm/a	$80 < r_{\text{corr}} \leq 200$	$4,2 < r_{\text{corr}} \leq 8,4$	$2,8 < r_{\text{corr}} \leq 5,6$	—
CX	g/(m ² ·a)	$1\ 500 < r_{\text{corr}} \leq 5\ 500$	$60 < r_{\text{corr}} \leq 180$	$50 < r_{\text{corr}} \leq 90$	$r_{\text{corr}} > 10$
	μm/a	$200 < r_{\text{corr}} \leq 700$	$8,4 < r_{\text{corr}} \leq 25$	$5,6 < r_{\text{corr}} \leq 10$	—

Fuente: (ISO 9223, 2012)

Estimación de la velocidad de corrosión de acuerdo a la función dosis respuesta según ISO 9223 del 2012

La estimación de la velocidad de corrosión (V_{corr} , en $\mu\text{m/año}$) a un año de exposición se puede hacer con la función dosis respuesta de la ISO 9223 para el aluminio, .

$$V_{corr} = 0,042P_d \cdot 0,73 \exp(0,025RH + f_{Al}) + 0,0018S_d \cdot 0,60 \exp(0,020RH + 0,094T) \quad (\text{Ec. 3})$$

$$f_{Al} = -0,043 \cdot (T - 10) \quad (\text{Ec. 4})$$

En la cual **T** es la temperatura anual promedio (en °C), **RH** la humedad relativa anual promedio (RH en %), **Sd** y **Pd** corresponde a la deposición de cloruros y dióxidos de azufre (en $\text{mg/m}^2.\text{día}$), respectivamente. La función **FAL** hace referencia a la función temperatura. Cabe resaltar que se debe hacer el proceso para presentar las unidades de V_{corr} en $\text{g}/(\text{m}^2.\text{año})$, para lo cual se multiplica por la densidad en g/cm^3 (para el aluminio es $2,7 \text{ g/cm}^3$). Por otro lado, la concentración dióxido de azufre ($\mu\text{m}/\text{m}^3$) se puede emplear para hallar la deposición de SO_2 ($\text{mg}/\text{m}^2.\text{día}$), donde se multiplica por el factor 0,8. Comparando la función dosis respuesta de la ISO 9223 del 2012 con la expuesta en la sección anterior (Kucera, 2020), se puede ver que la de la ISO 9223 no cuenta con la variable de precipitación.

2.4.3. Determinación matemática de la velocidad de corrosión por decapado químico.

La velocidad de corrosión se puede expresar como pérdida de masa por unidad de área o como tasa de reducción de espesor.

Velocidad de corrosión expresada como pérdida de masa por unidad de área:

$$V_{corr} = \frac{\Delta m}{A \cdot t} \quad \left[\frac{\text{g}}{\text{m}^2 \cdot \text{a}} \right] \quad (\text{Ec.5})$$

Velocidad de corrosión expresada como pérdida de reducción de espesor:

$$V'_{corr} = \frac{\Delta m}{A \cdot \rho \cdot t} \quad \left[\frac{\mu\text{m}}{\text{a}} \right] \quad (\text{Ec.6})$$

Δm = pérdida de masa [g]

A = Area superficial [m^2]

t = tiempo de exposición [Años]

ρ =densidad del metal [$\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$]

Se resalta que si al momento de realizar el informe se sabe que hay valores medidos que hayan presentado errores antes, durante o después de la prueba de decapado, deben ser especificados.

2.5. Microscopía electrónica de barrido (MEB)

Es una herramienta aplicada en el estudio de la corrosión que permite obtener una información gráfica sobre la morfología y fases cristalográficas entre otras, sus capturas tienden a tener una presentación tridimensional y cuenta con una resolución entre 20 nm y 10 nm.

La microscopía electrónica de barrido (MEB) consiste en un haz de luz generado por la liberación de energía de electrones que son excitados por un voltaje que está entre 0,1 kV y 30 kV, el cual permite obtener una imagen de la composición morfológica de un material, en este caso la superficie de la aleación de aluminio 6061, dichas muestra o captura se obtiene en modo magnético y está en los rangos de micrómetros (1×10^{-6} m) y nanómetros (1×10^{-9} m).

MEB cuenta con una serie de limitaciones y es que para que haya un correcto funcionamiento se requieren muestras que sean conductoras, estén libres de humedad y por otra parte no permite ver la estructura interna de la muestra ni tener detalles ultraestructurales (Universidad de los Andes, s.f.).

2.6. Procedimiento de análisis EIS

La espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) es una técnica que se basa en los fenómenos eléctricos de corrientes y voltajes, analizándolos desde su parte fasorial, a través del plano de Argán, es decir desde el plano complejo. Se caracteriza por su gran capacidad para poder analizar sistemas electroquímicos haciendo el uso de la frecuencia y unos voltajes previamente definidos (Mendoza, Duran & Genesca, s.f.).

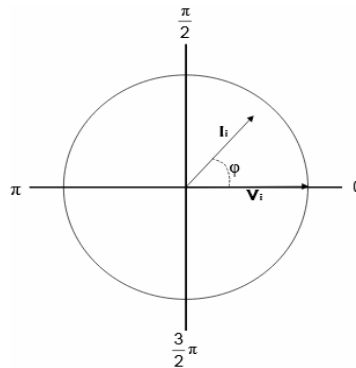
Al aplicar una señal sinusoidal ya sea de voltaje, corriente u otra de interés como lo puede ser la velocidad de rotación, y con esto poder medir la señal de impedancia de carga de respuesta, normalmente las señales de excitación son pequeñas, del nivel de los milis (1×10^{-3}). La ecuación característica del voltaje y corriente son las siguientes:

$$V_i = V_p * \sin(\omega t) \quad (\text{Ec.7})$$

$$I_i = I_{max} * \sin(\omega t + \varphi) \quad (\text{Ec.8})$$

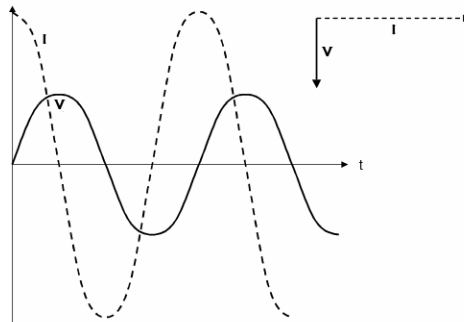
$$\omega = 2\pi * f \quad (\text{Ec.9})$$

Figura 1: Comportamiento fasorial de corriente y voltaje con ángulo de desfase con el voltaje como referencia.



FUENTE: (Mendoza, Duran & Genesca, s.f.)

Figura 2: Comportamiento de las ecuaciones 3 y 4 con voltaje instantáneo de referencia y corriente instantánea con ángulo de desfase.



Fuente: (Mendoza, Duran & Genesca, s.f.)

La impedancia de una reacción simple de transferencia de carga puede hallarse a partir de la siguiente ecuación:

$$Z(\omega) = V(\omega)/I(\omega) \quad (\text{Ec.10})$$

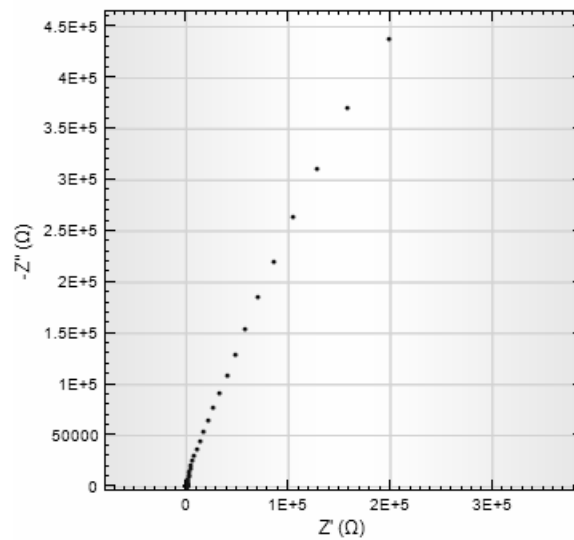
Dicha impedancia está en función de la frecuencia de trabajo, normalmente el rango de frecuencia para las pruebas electroquímicas están entre 0,01 Hz y 100 kHz, la impedancia es posible hallarla a partir de la ley de ohm y operaciones básicas con números complejos y esta es posible representarla en el plano de Argán, su representación matemática es la siguiente (Metrohm Autolab B.V., s.f.):

$$Z(\omega) = Z'(\omega) - jZ''(\omega) \quad (\text{Ec.11})$$

Donde $Z'(\omega)$ es la parte real y $Z''(\omega)$ es el componente complejo y j es $\sqrt{-1}$.

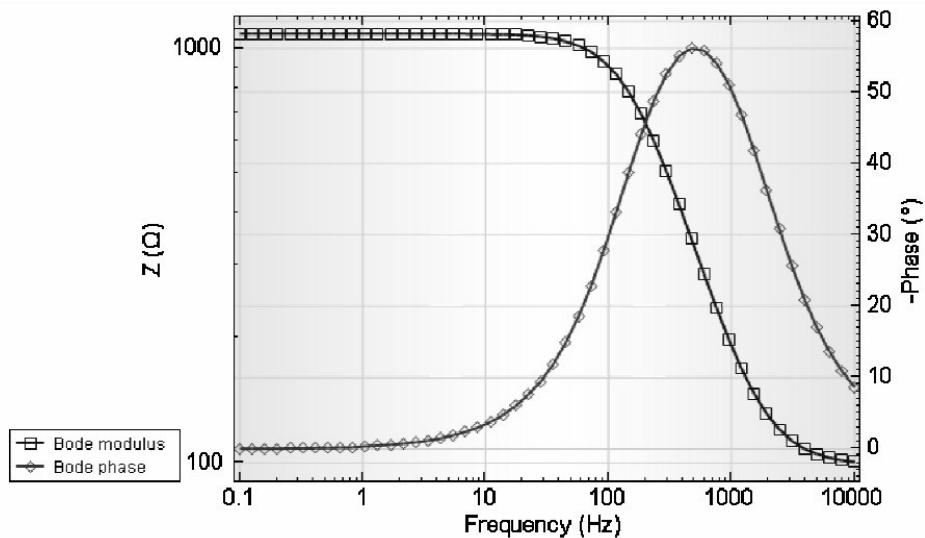
Una buena herramienta y método para dar buenas interpretaciones de la impedancia de carga es el diagrama de Nyquist **figura [3]**, en el cual es posible interpretar parte de las características de la impedancia dado que a bajas frecuencias tiende a ser muy resistiva y a altas frecuencias tiende a ser capacitiva, es decir que su parte imaginaria es mayor que su componente real, por otra parte en el diagrama de bode **figura [4]** es posible conocer el número de elementos de fase constante puede requerir unos resultados de EIS para hacer el respectivo ajuste y a su vez sabiendo que tan capacitiva es la impedancia resultante del circuito equivalente.

Figura 3: Diagrama de Nyquist.



Fuente: (Metrohm Autolab B.V., s.f.)

Figura 4: Diagrama de Bode.



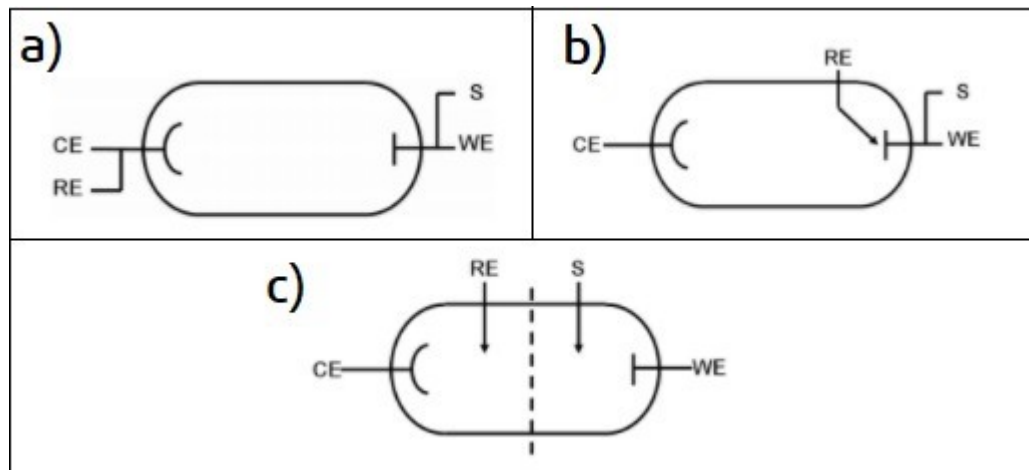
Fuente: (Metrohm Autolab B.V., s.f.)

Para toma de datos experimentales de EIS se requiere un sistema de celda electroquímica, la cual puede tener presentarse en cuatro configuraciones, la primera esta compuesta de mínimo dos electrodos **figura [5.a]**, donde esta el electrodo de trabajo y el electrodo requerido para cerrar el circuito, más conocido como contra electrodo, se usa también cuando el manejo del potencial es muy preciso, investigar el electrolito, conductividad o para caracterizar sólidos en sistemas estables. La segunda está compuesta por un sistema de tres electrodos **figura [5.b]**, esta configuración cuenta con un tercer electrodo conocido como electrodo de referencia con el cual se determina el potencial a través de la interfaz electroquímica, y la tercera cuenta con un sistema de cuatro electrodos **figura [5.c]** se usa para analizar procesos dentro del electrolito y así poder analizar comportamiento como lo es el transporte de un ion a través de una membrana (Metrohm Autolab B.V., s.f.).

Para la realización de las pruebas de impedancia electroquímica EIS empleó una celda electroquímica de tres electrodos: un contraelectrodo de platino, un electrodo de Ag/AgCl3 (como electrodo de referencia) y el electrodo de trabajo (muestra de aluminio a evaluar).

Es importante resaltar que se empleó una celda de ensayo para lámina plana (similar a la empleada para evaluar recubrimientos), ya que permitió hacer la evaluación del comportamiento del material en un área específica de la lámina.

Figura 5: configuraciones de celda de electrodos a)configuración de dos electrodos b)configuración de tres electrodos c)configuración de cuatro electrodos.



Fuente: (Metrohm Autolab B.V., s.f.)

2.6.1. Configuración instrumental

Las mediciones de EIS son posibles realizarlas con un potenciostato o un galvanostático, en la primera opción se aplica un voltaje ac que se superpone en un dc, se aplican sobre

la celda y la corriente resultante permite determinar la impedancia sistema; en el caso del galvanostático es igual aunque se trabajan con corrientes y se obtiene el voltaje resultante y con él se halla la impedancia del sistema. (Metrohm Autolab B.V., s.f.).

2.6.2. Amplitud de perturbación.

Es importante que asegurar la condición de linealidad en la respuesta de impedancia sin importar la amplitud de la perturbación, esto se logra ni con un voltaje muy pequeño ni con uno muy grande, normalmente se usa un voltaje de 10 mV, hay que verificar a la condición de linealidad con diferentes intervenciones a diferentes amplitudes y observar la respuesta de la impedancia. (Metrohm Autolab B.V., s.f.).






2.6.3. Rango de frecuencias.

Idealmente entre más grande sea el rango de frecuencia es mejor a la hora de capturar las constantes de tiempo del sistema pero esto experimentalmente no es posible ya que el rango del potencióstato no es tan grande y por otra parte el electrodo de referencia tiene un tiempo de respuesta lento, porque el tiempo de respuesta es el inverso de la frecuencia, los potencióstatos pueden alcanzar una frecuencia hasta de 1 MHz. y el tiempo de medición para dicho rango puede llegar a durar 10 minutos (Metrohm Autolab B.V., s.f.).

2.6.4. Análisis de datos (Circuito equivalente)

Para hacer el debido análisis de los datos de impedancia electroquímica (EIS) se debe elaborar un circuito equivalente, el cual estará compuesto principalmente por elementos de fase constante y resistencias, con el fin de que estos puedan lograr un ajuste claro que sea congruente con los espectros de EIS.

Tabla 7: Elementos comunes de circuito equivalente.

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		$Z_W = \frac{1}{Y_0\sqrt{j\omega}}$

Fuente: (software nova 1.11, s.f.)

La **tabla 7** presenta los elementos comunes empleados en un circuito equivalente con sus respectivos símbolos y expresiones matemáticas, los cuales se utilizan al realizar la

simulación en el software nova (versión 1.11) . A continuación se explicará cada elemento por separado.

Resistencia, R

La impedancia de las resistencias no cuenta con una parte imaginaria, esto es debido a que no dependen de la frecuencia del sistema y por lo tanto la corriente siempre estará en fase con el voltaje, por lo tanto el valor de la impedancia resistiva siempre será el mismo valor de la resistencia, como lo muestra la **tabla 7**.

Capacitancia, C

Como se observa en la expresión de la **tabla 7**, la impedancia capacitiva depende de la frecuencia del sistema y a diferencia de las resistencias, está solo cuenta con parte imaginaria. El valor de la impedancia capacitiva aumenta a medida que disminuye la magnitud de la frecuencia y como se aprecia en la **tabla 7**, si se tiene la expresión en forma fasorial se puede ver que la corriente que pasa a través de este elemento cuenta con un desfase de -90° respecto al voltaje.

Inductancia, L

Observando la expresión de la inductancia en la **tabla 7**, se puede ver claramente que la impedancia inductiva, al igual que la capacitancia sólo cuenta con parte imaginaria. El valor de la impedancia inductiva aumenta a medida que los valores de la frecuencia son mayores y como se aprecia en la **tabla 7**, si se tiene la expresión en forma fasorial se puede ver que la corriente que pasa a través de este elemento cuenta con un desfase de $+90^\circ$ en comparación al voltaje.

Elemento de fase constante, CPE

Al momento de ejecutar el método de impedancia electroquímica, este asume que la superficie del material de trabajo es de tipo homogénea, lo cual es erróneo para un análisis de corrosión, debido a que se puede presentar corrosión localizada en cualquier espacio sobre la superficie y puede ir llevando el material a una falta de homogeneidad, ya que puede presentar rugosidad, falta de pulido, granos, etc, por esta razón el objetivo del elemento de fase constante es modelar esta heterogeneidad del material.

Las variables de la expresión matemática para el elemento de fase constante presentadas en la **tabla 7** representan lo siguiente: Y_0 es una admitancia de una capacitancia ideal y n es una constante empírica que tiene valores comprendidos entre 0 y 1, cuando $n=0$ CPE representa un resistor puro, con $n=0,5$ CPE representa una impedancia de warburg y con $n=1$ se tiene que el elemento de fase constante representa un capacitor puro (Metrohm Autolab B.V., s.f.).

Resistencia óhmica (R_Ω):

También conocida como la resistencia de solución, es la resistencia entre el electrodo de referencia y el de trabajo, esta resistencia depende de la geometría del electrodo y conductividad del electrolito. La expresión matemática de la resistencia es:

$$R_{\Omega} = \frac{1}{4kR} \quad (\text{Ec.12})$$

Donde k es la conductividad del electrolito y r es el radio del disco, pero cuando la geometría es muy compleja esta resistencia se determina experimentalmente (Metrohm Autolab B.V., s.f.).

Resistencia de polarización.

La resistencia de polarización está definida como una resistencia frente a efectos de oxidación en la muestra cuando se le aplica una señal de potencial (Toshev, 2006), debido a esto, la resistencia de polarización tiene una relación inversa frente a la velocidad de corrosión. De acuerdo a lo explicado anteriormente se puede realizar un análisis de velocidad de corrosión respecto al tiempo de exposición de algunas muestras teniendo el resultado de cuantitativo de la resistencia de polarización. Una forma de calcular la resistencia de polarización de una muestra es con los resultados de los espectros de impedancia electroquímica (EIS), para más explicitud, esta resistencia se calcula con la gráfica de módulo de bode, la cual nos da el valor de la magnitud de la impedancia en función de la frecuencia.

$$R_P = Z_L - Z_H \quad (\text{Ec.13})$$

Donde R_P es la resistencia de polarización, Z_L y Z_H son las impedancias a baja y alta frecuencia respectivamente, lo que nos da a concluir que entre mayor sea la diferencia entre impedancias menor será la magnitud de la velocidad de corrosión (Yanjie, 2013).

Capacitancia de doble capa, C_{dl}

La capacitancia de doble capa tiene relación directa con la interfase electrodo/electrolito. Para comprenderla de una mejor manera se tiene que saber que la corriente de iones cuenta con uno de dos procesos en la muestra, los dos procesos se denominan como faradaicos y no faradaicos, en el primero se cuenta con reacciones químicas y paso de electrones en la interfaz electrodo-solución y en el segundo proceso no hay reacciones de transferencia de carga, lo cual se debe a deserciones iónicas que alteran el circuito en AC. Una vez explicados los anteriores dos procesos, se da paso a la explicación de la formación de la capacitancia de doble capa, la cual se da cuando iones de la solución se acercan a la superficie del electrodo e inducen en el mismo cargas de signo opuesto generando la doble capa eléctrica, por lo tanto esta impedancia capacitiva de doble capa permite modelar el paso de cargas no faradaicas mencionadas anteriormente (Piratoba, Vera & Ortiz, 2010).

Pseudo Capacitancia

Por lo general los ajustes de los espectros de impedancia electroquímica se elaboran con elementos pseudo capacitivos, ya que se acoplan de una mejor manera a los datos experimentales producidos por EIS. El elemento pseudo capacitivo refiere a una resistencia en paralelo con un elemento de fase constante. A diferencia de la capacitancia de doble capa, este elemento si modela las cargas de tipo faradaicas, es decir que cuenta con reacciones químicas, en las cuales hay un proceso de transferencia de carga en electrodo-electrolito y la pseudo capacitancia tiene la capacidad de almacenarla. En todo este proceso, la transferencia de carga depende en gran parte de las condiciones superficiales del electrodo. El valor de la pseudo capacitancia se halla a través de la siguiente ecuación (Vaquero Morata, 2015):

$$C_{pseudo} = Y_0 \frac{1}{n} \cdot R^{(\frac{1}{n}-1)} \quad (\text{Ec. 14})$$

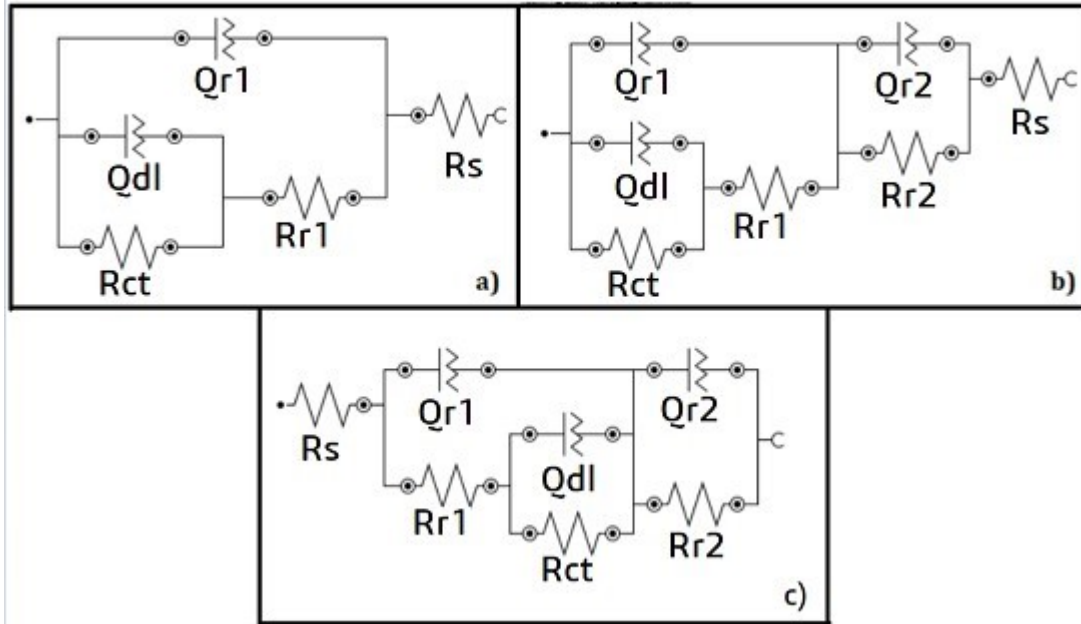
Donde n y Y_0 corresponden al exponente y la admitancia del elemento de fase constante respectivamente (software nova 1.11, s.f.).

2.6.5. Modelos de circuitos equivalentes para la simulación de corrosión atmosférica.

Los circuitos mostrados en la **figura 6** son reportados en la simulación de espectros de impedancia electroquímica, en estudios de corrosión atmosférica del aluminio. En cuanto a los elementos representados en la **figura 6** se tiene que Q_{r1} y R_{r1} representan las propiedades dieléctricas del óxido nativo, Q_{dl} y R_{ct} dan a conocer los procesos de transferencia de carga, Q_{r2} y R_{r2} representan las características del producto de corrosión formado y, por último, R_s , que es la resistencia de solución.

El circuito de la **figura 6a** se utiliza por lo general para modelar los espectros de impedancia electroquímica cuando la aleación a analizar aún no ha sido expuesta atmosféricamente, fue expuesto en una zona con bajo nivel de contaminantes agresivos en el aire, o el tiempo de exposición es corto, a diferencia de los circuitos de las **figuras 6b y 6c** que se utilizan para modelar espectros de muestras que llevan un mayor tiempo de exposición a la atmósfera, debido a que estos últimos circuitos ya cuentan con elementos que pueden modelar las características del producto de corrosión formado (Q_{r2} y R_{r2}) que se dan con el tiempo de exposición.

Las principales diferencias entre los circuitos de la **figura 6b y 6c** son que el primero está asumiendo que el producto de corrosión formado está sobre la película nativa, ya que está en mayor contacto con la solución que con el metal, y para la **figura 6c** se asume que el producto de corrosión formado esté sobre el metal, ya que se puede dar un ataque localizado que destruya la capa nativa y lleve a que el producto de corrosión se forme directamente en el metal.

Figura 6: Circuitos equivalentes para los ajustes de EIS en zonas costeras.

3. Capítulo 3: metodología

3.1. Datos meteorológicos y de contaminantes

Los datos meteorológicos de temperatura, humedad relativa y precipitación, así como de contaminantes (sulfatos y cloruros) son consultados de reportes realizados por entidades que tienen estaciones meteorológicas activas en la ciudad de Cartagena, principalmente el IDEAM, y han recopilado información en la última década. En adición, se consulta información reportada en estudios realizados en la zona, es el caso del DIMAR, donde se obtuvo información que no estaba disponible en el periodo de tiempo de exposición de las muestras. La información indicada es importante para explicar los resultados del comportamiento de la corrosión sobre el metal (aleación de aluminio 6061) en el periodo de tiempo de exposición, comprendida entre abril de 2016 y abril de 2017, con seguimiento de las muestras luego de 1, 6 y 12 meses de exposición.

MÉTODO DE LA VELA PARA DEPOSICIÓN DE CLORUROS

La deposición de cloruros fue la variable de datos de contaminantes medida en el proyecto y considerada para este trabajo, con ayuda del método de la vela y especificaciones de la

norma G-140, en el cual por medio de este método y luego de llevar las muestras a un análisis químico se determina la deposición de cloruros en $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{día})$, debido a que para las funciones dosis respuesta se necesita realizar conversiones de esta unidad a mg/L , en la ecuación 2 (**ecuación 15 del documento**) especificada en la norma G-140 se especifica la forma de conversión de unidades.

$$\text{mg CL}^- / \text{m}^2 / \text{dia} = \text{mg CL}^- / \text{L} \quad (\text{Ec.14})$$

$$2At$$

Donde **t** es el tiempo de exposición en días (para el proyecto es de 30 días por intervalo de tiempo) y **A** es el área expuesta de la gasa (determinada por medio de la ecuación 3 de la norma G-140, es igual a 110 cm^2).

3.2. Estimación de la velocidad de corrosión

Una estimación de la velocidad de corrosión se realiza empleando las funciones dosis-respuesta del aluminio establecidas en el desarrollo del Programa de Cooperación Internacional sobre los Efectos en los Materiales, incluyendo Monumentos Históricos y Culturales (ICP Materials)(Kucera, 2020), y la norma 9223 del 2012, esta última basada en la propuesta de Mikhailov en el año 2004, ecuaciones (1) y (3), respectivamente. Para ello, se hace uso de los valores promedio anuales de los parámetros meteorológicos y de contaminantes del aire requeridos en dichas funciones.

3.3. Recopilación y análisis de los datos de velocidad de corrosión

Por medio del procedimiento del decapado químico se determina la velocidad de corrosión de las muestras, siguiendo los lineamientos de normas internacionales para determinar la pérdida de masa. A continuación se presenta alguna información relacionada con el procedimiento.

3.3.1. Procedimiento de decapado químico para determinar velocidad de corrosión.

El procedimiento de decapado químico consiste en retirar progresiva y cíclicamente el producto de corrosión formado sin afectar el metal base, lo que permite una determinación precisa de la pérdida de masa.

Según la norma ISO 9226 del 2012 la caracterización de un sitio de prueba de corrosión se puede determinar durante un año de exposición a la atmósfera, debido a que la corrosividad de los lugares de exposición se deducen a través de la tasa de corrosión a partir de la pérdida de masa de los especímenes expuestos en un año. La norma mencionada en el

actual párrafo genera medidas válidas, pero no se basa en la penetración debido al producto de corrosión formado. Las probetas o especímenes que hayan sido utilizados durante la prueba en un año, pueden seguir siendo utilizados para estudiar las tasas de corrosión en un mayor periodo de tiempo.

3.3.2. Preparación de especímenes estándar (norma ISO 9226 del 2012)

En el proyecto se emplean probetas de aluminio 6061 de 100mm X 50mm X 3mm. La aleación de aluminio empleada en el estudio tiene una composición de ..., de acuerdo al resultado de composición química por Espectroscopía de Emisión Óptica.

Las probetas son limpiadas con etanol antes de ser expuestas, luego son secadas y posteriormente pesadas usando una balanza analítica para conocer la masa inicial de cada una de las probetas.

3.3.3. Exposición de las muestras estándar

Después de que las muestras hayan sido limpiadas, pesadas y marcadas correctamente se exponen debido a las indicaciones establecidas en la norma ISO 8565.

Tres probetas fueron dispuestas para cada uno de los tiempos de evaluación en los diferentes sitios considerados, en este trabajo se considera los tiempos luego de 1, 6 y 12 meses de exposición. Luego de transcurrir cada tiempo considerado, las muestras son retiradas y llevadas a laboratorio para la determinación de la velocidad de corrosión donde los productos de corrosión formados fueron limpiados de la forma más conveniente con el objetivo de no afectar el metal base (según tabla: procedimientos de limpieza química para la eliminación de productos corrosivos). Este procedimiento fue realizado en las instalaciones de la Universidad de la Costa y llevada a cabo por la Profesora Heidis Cano. El proceso de limpieza se debe repetir varias veces en ciclos de limpieza iguales, una recomendación es graficar la pérdida de masa en función del ciclo de limpieza para tener una mayor precisión cuando la pendiente de la gráfica sea menor.

El análisis morfológico de la superficie del producto de corrosión formado sobre la aleación de aluminio se realiza por medio de la microscopía electrónica de barrido (MEB) para lo cual fue empleado un equipo de referencia JEOL-JSM 6490LV disponible en el Laboratorio de Microscopía de la Universidad de Antioquia. Imágenes de la superficie del producto de corrosión formado sobre la aleación luego de un año de exposición son realizadas a magnificaciones de ... para la observación de la morfología y determinación del tipo de corrosión y las afectaciones que presenta este material.

3.4. Medidas de Impedancia Electroquímica (EIS)

Se empleó la Espectroscopía de Impedancia Electroquímica empleada para la evaluación del comportamiento de la aleación de aluminio 6061. Para ello se emplea una configuración de tres electrodos Figura [6.b], con un electrodo de cloruro de plata (electrodo de referencia), un electrodo de platino (contraelectrodo) y la probeta de aleación de aluminio (electrodo de trabajo). Las medidas fueron realizadas en el potencial de circuito abierto con una amplitud de la señal de voltaje de 10 mV, en el rango de frecuencias de 10 kHz a 10 mHz (en un orden de altas a bajas frecuencias), empleando una solución 0,1 molar de cloruro de sodio, y con un área de evaluación de 3,1 cm².

3.5. Simulación de impedancia

La evaluación del comportamiento a la corrosión atmosférica de la aleación de aluminio, luego de aplicar las pruebas de EIS, fue llevado a cabo con el software NOVA, adecuado para simular por medio de un circuito equivalente el comportamiento obtenido en la impedancia. En este software se plantea un modelo para el análisis de resultados de EIS donde se realiza una serie de iteraciones sobre las magnitudes de los elementos de dicho circuito y con ello lograr el mejor ajuste posible, respetando una serie de rangos en los cuales normalmente están los elementos de fase constante y resistencias. Lo anterior, para así poder hacer un adecuado análisis del comportamiento a la corrosión de la aleación de aluminio 6061.

3.6. Microscopía electrónica de barrido (MEB)

A partir de un microscopio electrónico de barrido usado para las capturas de la superficie del material tiene como referencia JEOL-JSM6492LV, cuenta con una resolución de 3,0 nm en alto vacío y 4,0 nm en bajo vacío, este equipo cuenta con cuatro detectores los cuales permiten obtener las diferentes fotografías de la superficie del aluminio 6061, donde cada uno tiene una función esencial:

- **Detector de electrones secundarios tipo E-T (Everhart-Thornley)**, Muestra la imagen con mejor resolución de la superficie en estudio en blanco y negro.
- **Detector de electrones retrodispersados de estado sólido multielementos**, al ser sensible al número atómico de los diferentes componentes que presenta la superficie en estudio y es por tal razón que su imagen lograda muestra una escala de grises, algunos más intensos que otros.
- **Detector de espectroscopía por dispersión de energía de rayos X (EDS)**, este detector es el receptor de los rayos X reflejados por los elementos sobre la superficie del material, dado que los elementos de una superficie tienen sus diferentes características, estos reflejan un rayo característico que permite obtener sus cualidades e información cuantitativa.
- **Detector de electrones secundarios para observaciones en el modo de bajo vacío.**

Las imágenes presentadas en el análisis de resultados (imágenes MEB) fueron obtenidas por medio del detector de electrones retrodispersados de estado sólido multielementos el cual permite ver una escala de grises lo cual permite tener una mejor visualización sobre la morfología presentada por la superficie de la aleación de aluminio 6061 luego de haberse expuesto.

Cabe resaltar que los resultados con los que trabajara hacen parte del proyecto de elaboración de mapas de degradación del patrimonio arquitectónico mediante la medición de niveles de corrosividad, y estudio del impacto socioeconómico que genera la degradación de este en la ciudad de Cartagena de Indias

4. Discusión de resultados

4.1. Consulta de información meteorológica

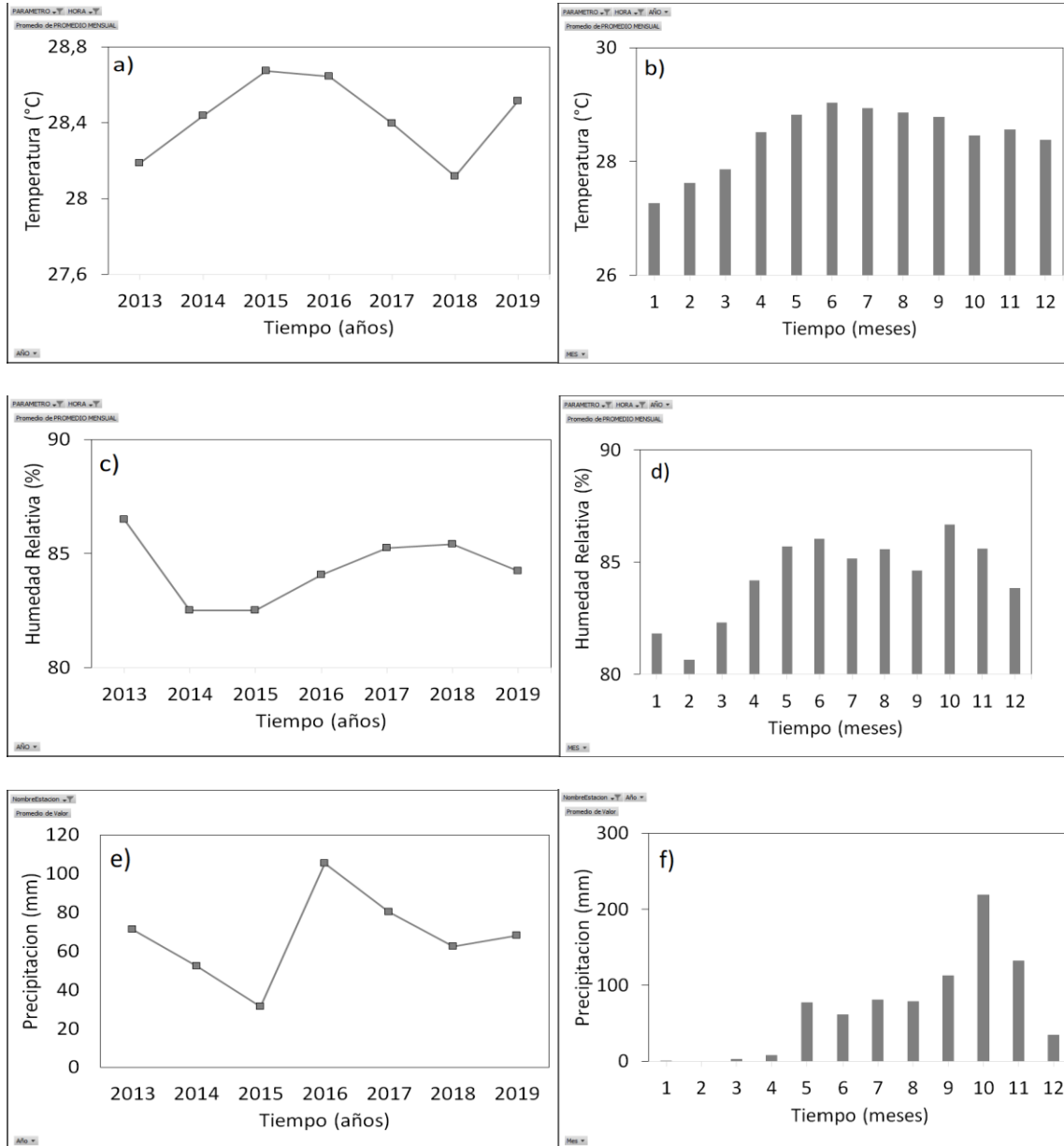
Para la obtención de datos meteorológicos se acude a consultar informes realizados por las instituciones del Ideam (Ideam, 2013) y el Dimar (Dirección General Marítima, 2013), para conocer las tendencias de la temperatura de bulbo seco, humedad relativa y precipitación en la ciudad de Cartagena de Indias, buscando que estos factores puedan ser de utilidad a la hora de analizar el comportamiento a la corrosión de las diferentes muestras de la aleación de aluminio 6061.

Los datos de precipitación de las **figuras 7e) y 7f)** fueron censados por parte de la institución del ideam con ayuda de un pluviómetro en la estación ubicada en el aeropuerto Rafael Nuñez con código 14015080, dando como resultado la precipitación total mensual en milímetros (mm) o litros por metro cuadrado (L/m²), cabe resaltar que esta estación queda muy cerca a la playa (aproximadamente cinco cuadras).

Los valores de temperatura de bulbo seco y humedad relativa (en unidades de °C y % respectivamente) expuestos en las **figuras 7a) - 7d)**, fueron reportados por la Dirección General Marítima de la ciudad de Cartagena de Indias, mostrando el promedio mensual de los datos (temperatura y humedad relativa) en boletines meteorológicos del Caribe colombiano, la estación en la cual fueron censados estos datos se ubica aledaña al parque del centenario, al noroeste de la ciudad de Cartagena de Indias.

Cartagena presenta un clima de tipo cálido-seco (Ideam, 2020), si se observa la **figura 7a)** se observa que la temperatura promedio anual entre el año 2013 y 2020 está entre 28,1 °C y 28,7 °C con un valor medio de aproximadamente 28,4°C, presentando los años 2015 y 2016 como los de mayor temperatura (aproximadamente 28,7°C) y el año 2018 como el que presenta la menor temperatura (aproximadamente 28°C). Un análisis del valor promedio mensual durante este tiempo (ver figura 7b), se puede observar que los meses más calurosos del año son a mitad del mismo (mayo, junio, julio y agosto), y los de menor temperatura corresponden a los meses de principio de año (Enero, febrero y marzo).

Figura 7: Datos meteorológicos en Cartagena.



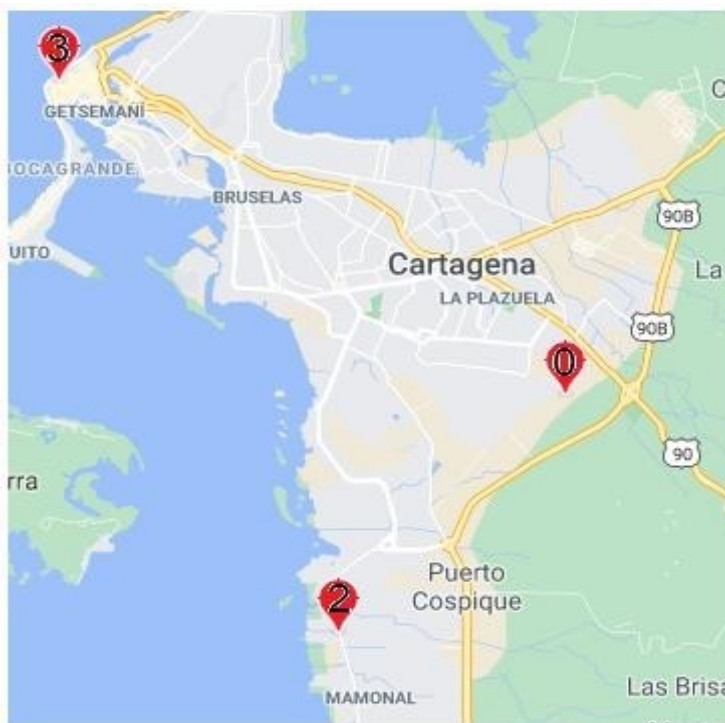
En cuanto a la humedad relativa de la **figura 7c)** se puede observar que del año 2015 al 2016 se genera un leve aumento en el promedio de humedad relativa anual (83% a 84,5%), el promedio de humedad relativa entre el año 2013 y 2019 se mantiene cerca del 84,5% teniendo como los años más secos el 2014 y 2015, los más húmedos son el 2013, 2017 y 2018. En cuanto el análisis de humedad relativa por meses se tiene que los años más secos son los correspondientes a los primeros meses del año (Enero, Febrero y marzo), de abril a diciembre la humedad relativa se mantiene en un promedio del 85%, pero si se logra ver con mayor claridad que el mes que presenta una mayor humedad relativa entre ellos es Octubre con aproximadamente un valor de 86,5%.

Del 2013 al 2019 se presenta una precipitación promedio mensual de aproximadamente 75 mm, presentando el mayor cambio de menor a mayor precipitación entre los años 2015 y 2016 con un promedio de 30 a 110 mm. Si se ve la precipitación detenidamente con el promedio por meses en un año se puede observar que los meses del año más secos son los primeros del año (enero, febrero, marzo y abril), luego se mantiene en un promedio de 100 mm aproximadamente de mayo a diciembre, teniendo como el mes más lluvioso el de octubre que supera por poco los 200 mm de precipitación, lo cual debe dar respuesta a que por esta razón en este mes también se presente el mayor valor de humedad relativa, como se expone en el párrafo anterior.

4.2. Consulta de información de contaminantes del aire

Cartagena de Indias, como todas las grandes ciudades de Colombia cuenta con concentraciones de contaminantes en el aire, bien sea por las actividades cotidianas de los habitantes o las grandes y pequeñas industrias en la ciudad.

Figura 8: Ubicación de exposición de las muestras



Fuente: (Google maps, 2020)

Para el proyecto se halla un promedio de concentración de contaminantes del aire (dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre y PM10) en los lugares que fueron expuestas las muestras de la aleación de aluminio 6061 en la ciudad de cartagena, dichos lugares específicos son el colegio mayor de Bolívar sobre la zona amurallada de la ciudad (**sitio 3 de la figura 8**),

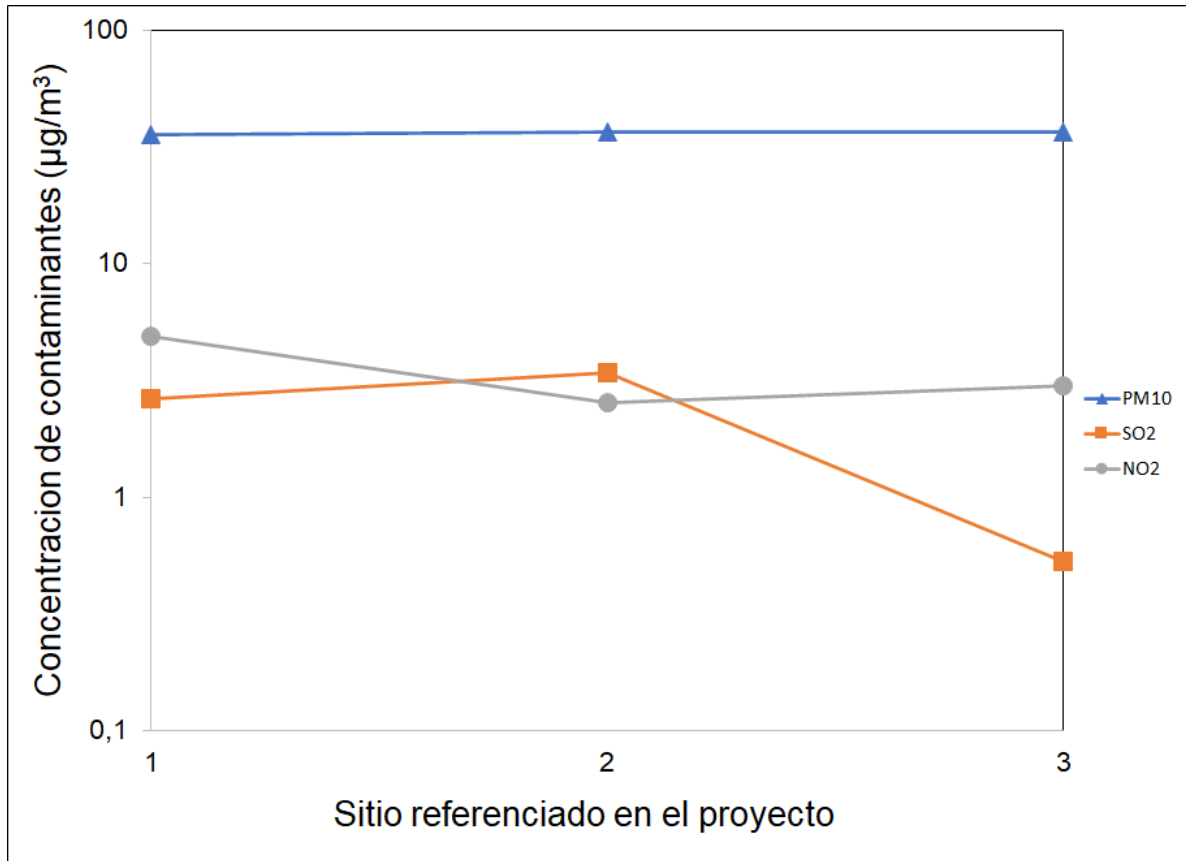
Cotecmar sobre la zona industrial de mamonal (**sitio 2 de la figura 8**) y UTB, universidad tecnologica de Bolivar (**sitio 0 de la figura 8**). El promedio de concentración de contaminantes en la ciudad está reportado en la **tabla 8**, y los datos para elaborarla fueron tomados de valoración de niveles de riesgos ambientales en el distrito de cartagena para el año 2010 (ResearchGate, 2010).

En la **tabla 8** se muestra el resultado de algunos contaminantes en la ciudad de cartagena para el año 2010, como se puede observar, dos de material particulado (PM10) reportan un valor mayor al permitido por la resolución 610 del 2010 (Minambiente, 2020), el cual es $50(\mu\text{g}/\text{m}^3)$, estos lugares son la intersección de jardines, socorro y la victoria junto con el colegio de la candelaria. En cuanto a dióxidos de azufre y dióxidos de nitrógeno, se puede ver que estos valores de concentración cumplen la resolución 610 del 2010 (Minambiente, 2020), reportando datos menores a los permitidos, los cuales son $80(\mu\text{g}/\text{m}^3)$ para SO_2 y $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ para NO_2 .

Tabla 8: Datos de contaminantes del aire en Cartagena 2010

SITIO REFERENCIADO EN EL PROYECTO	NOMBRE DEL SITIO	ESTACIONES ALEDAÑAS AL SITIO	PARAMETRO		
			PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	SO2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	NO2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
0	UTB (Universidad tecnologica de bolivar)	Inter. socorro, jardines, la victoria	51	1,27	4,76
		Colegio Juan Jose Nieto	33	1,27	0,98
		Bomba texaco ternera	24	5,37	9,01
		PROMEDIO	36	2,64	4,92
2	Cotecmar	Cai Pasacaballos	37	3,4	2,54
		PROMEDIO	37	3,4	2,54
3	Colegio mayor de Bolivar	Cai lemaître	31	0,86	4,31
		Cai Santa Rita	29	0,87	3,03
		Sociedad de mejores publicas	20	0	1,83
		Colegio la Candelaria	67	0,4	2,9
		PROMEDIO	36,75	0,53	3,02

Debido a que no se cuenta con un censo de algunos contaminantes del aire en los puntos específicos en que fueron expuestas las muestras, con ayuda de estaciones ubicadas estratégicamente en diferentes puntos de la ciudad se elabora un promedio de PM10, dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno en diferentes zonas, teniendo en cuenta que en estas zonas se deben encontrar los tres lugares mencionados en el proyecto, estas zonas son el interior de la ciudad en la cual se encuentra la Universidad Tecnológica de Bolívar, la zona industrial de mamonal para estudiar lo referente al sitio de Cotecmar (la única estación aledaña es Cai pasacaballos) y por último, se halla el promedio de contaminantes en la parte amurallada de la ciudad, en la cual se encuentra el colegio mayor de Bolívar.

Figura 9: Promedio de contaminantes en el aire 2010.

En la **figura 9** y la **tabla 8** se puede observar que el nivel de material particulado en el aire presenta valores promedio similares para las diferentes zonas de la ciudad, presentando un promedio entre 36 a 37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En cuanto al dióxido de azufre se puede ver una gran diferencia entre los tres lugares definidos, se observa que la mayor concentración de azufre se da en el lugar 2 (Cotecmar), aproximadamente con 3,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, esto es debido a que este lugar se encuentra en la zona industrial de mamonal en donde pueden generar en mayor cantidad este tipo de contaminante, el segundo con mayor dióxido de azufre es el lugar 0 (UTB, universidad tecnologica de Bolivar) con una concentración promedio de 2,64 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, el cual está al interior de la ciudad y cuenta con este contaminante debido a quema de combustibles, por último, el lugar que menos concentración de dióxido de azufre es el 3 (Colegio mayor de Bolívar) que cuenta con una concentración cercana a 0,53 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, esto se debe a que es el lugar más alejado de la zona industrial y centro de la ciudad, y por eso genera el contaminante en menor concentración.

La mayor concentración de nitrógeno se da en el lugar 0 (UTB, universidad tecnologica de Bolivar) en la zona hacia el interior de la ciudad con aproximadamente 4,92 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, este contaminante se puede generar en las plantas eléctricas y para este caso el que lo puede estar generando puede ser en la planta tenaris tubo caribe. Para el lugar 2 y 3 (Cotecmar y Colegio mayor de Bolívar, respectivamente) la concentración de dióxido de azufre es muy constante, con 2,54 y 3,02 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, esto se debe a que son los lugares más cercanos al mar

y están más libres de contaminantes, y aunque Cotecmar se encuentre en una zona industrial puede que los procesos de combustión a altas temperaturas dependiendo del tipo de combustible no generan en mayor cantidad este tipo de contaminante.

Datos 2010

La ciudad de Cartagena de indias no ha sido constante a la hora de medir los datos de concentración de contaminantes en los periodos de tiempo de 2011-2019, para algunos años no se hizo el respectivo censo debido a que se estaba realizando el mantenimiento correctivo a los equipos, y para otros años, como es el caso de 2017 en adelante, algunas estaciones gubernamentales como EPA (establecimiento público ambiental) realizaron algunas mediciones pero entre estas no se encontraba la concentración de dióxido de azufre o dióxido de nitrógeno, los cuales son parámetros importantes para la realización del proyecto (Cartagena comovamos, 2020)(Epa Cartagena, 2017).

CONCENTRACIÓN DE CLORUROS

En los lugares de exposición de las muestras se realizó el respectivo censo de los cloruros presentes en el aire por vía húmeda (método de la vela), los datos se dan en unidades de deposición ($\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$) pero con ayuda de la ecuación 2 especificada en la norma G 140 se pasan a unidades de concentración (mg/L), los valores se muestran en la **tabla 9**.

Tabla 9: Cloruros en sitios de exposición de las muestras

Mes	UTB (mg/L)	COTECMAR (mg/L)	MAYOR (mg/L)
1	33,0	70,2	65,7
2	32,5	54,3	90,8
3	36,2	48,2	77,1
4	50,8	51,0	38,9
5	43,5	52,7	77,6
6	44,1	97,0	84,0
7	6,7	47,4	96,4
8			89,6
PROMEDIO	35,2	60,1	77,5

En la **tabla 9** se observa que los lugares de mayor concentración de cloruros son los más aledaños al mar, debido a que el mayor valor de promedio de cloruros se encuentra ubicado sobre la zona amurallada (Colegio mayor de bolívar, se encuentra aproximadamente a 96,7m del mar) y reporta aproximadamente una concentración de 77,5mg/L, el siguiente lugar se encuentra sobre la zona industrial de mamonal (Cotecmar, se encuentra aproximadamente a 614,14m del mar) y reporta un promedio de 60,1mg/L, y por último, el lugar que presenta la menor concentración de cloruros esta esta al interior de la ciudad

(Universidad tecnológica de Bolívar, se encuentra aproximadamente a 4,56km del mar) y reporta un dato de 35,2mg/L de concentración.

Debido a que los cloruros son pequeñas gotas líquidas o partículas sólidas presentes en el aire, se dan en mayor concentración cerca al mar, debido a factores meteorológicos, ya que las zonas aledañas al agua marina presentan mayores humedades que a su vez cuentan con concentración de cloro, y estas pequeñas partículas líquidas tienden a precipitarse sobre los materiales sólidos generando la deposición.

MATERIAL PARTICULADO 2017

Epa (establecimiento público ambiental) para el año 2017 censo los datos de material particulado PM10 en la ciudad de Cartagena de Indias como se muestra en la **tabla 10**, en comparación al promedio de PM10 del año 2010 (**tabla 8**) se puede observar que el aumento de concentración es alto, pasando de aproximadamente 36,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a 56,93 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de material particulado, esto se debe al crecimiento de la actividad industrial y vehicular que la ciudad ha tenido.

Tabla 10: Concentración de PM10 2017.

ESTACION	PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
BASE NAVAL	51,6
ZONA FRANCA	72,2
BOCANA	No reporta
POLICIA	47
PROMEDIO	56,9

No se hizo la respectiva comparación con otros contaminantes del aire como el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre para evaluar aproximadamente cuánta concentración habían aumentado en los 7 años de diferencia, debido a que como se mencionaba anteriormente estos dos contaminantes no son reportados para el año 2017 (Epa Cartagena, 2017).

4.3. Velocidad de corrosión.

4.3.1. Estimación de la velocidad de corrosión por función dosis-respuesta de Kucera.

La **tabla 11** contiene el valor de velocidad de corrosión estimado con la función dosis-respuesta (**ecuación 1 y 2**) desarrollada en el ICP Materials para las muestras luego de un año de exposición. La ecuación dosis-respuesta permite hacer una estimación de la pérdida de masa en los metales luego de ser expuestos atmosféricamente, y de acuerdo al tiempo de exposición en años se estima la velocidad de corrosión.

Tabla 11: Valor de velocidad de corrosión estimado por función dosis-respuesta.

LUGAR	Vcorr (g/(m ² .año))
UTB	1,1
COTECMAR	1,9
MAYOR	2,4

Los valores de la **tabla 11** se hallaron empleando la **ecuación 1 y la ecuación 2**, en dichas ecuaciones fueron reemplazados los valores de contaminantes del aire y datos meteorológicos expuestos en la **tabla 12** (los valores de la **tabla 12** fueron consultados previamente en las secciones de consulta de información meteorológica y de contaminantes del aire). Se tomaron los valores meteorológicos pertinentes del año 2016 y 2017 (años en que fueron expuestas las muestras). La pérdida de masa de la **ecuación 1** es igual a la velocidad de corrosión, debido a que esta es calculada para un año de exposición (La pérdida de masa se divide en un año, por lo tanto, $ML=V_{corr}$).

Tabla 12: Datos meteorológicos y de contaminantes para función dosis respuesta.

		UTB	Cotecmar	Mayor
Contaminantes del aire	Cl (mg/L)	35,2	60,1	77,5
	SO ₂ (µg/m ³)	2,6	3,4	0,5
Datos meteorológicos	Temperatura (°C)	28,6	28,6	28,6
	Precipitación (mm)	1306,4	1306,4	1306,4
	Humedad relativa (%)	84,4	84,4	84,4

Para la **tabla 11** se observa que luego de un año de exposición, la velocidad de corrosión es mayor para las muestras expuestas en los sitios de mayor cercanía al mar (Colegio Mayor de Bolívar, Cotecmar y Universidad Tecnológica de Bolívar), estos sitios también cuentan con una mayor concentración de cloruros (**Tabla 9**), por lo tanto, se puede prever un mayor ataque para Colegio mayor de Bolívar, como lo muestra la **tabla 11**, debido a que en estudios realizados previamente (Yanjie, 2013) se cuenta con que el cloruro es un factor que define en gran parte la velocidad de corrosión y picado sobre la muestra.

Los datos meteorológicos y de contaminantes reportados en la **tabla 12** rigen de la estimación de la velocidad de corrosión para la función dosis-respuesta, unos con mayor incidencia que otros, cuando se calculó la V_{corr} a partir de la **ecuación 1** fue evidente que los cloruros definen en gran parte la pérdida de masa, incluso tiene una mayor incidencia que los sulfatos (SO_2) y algunas otras variables, lo que explica lo mencionado anteriormente. Esta función dosis-respuesta brinda un valor de la velocidad de la corrosión en los diferentes sitios respecto al tiempo, basándose en la pérdida de masa, pero teniendo en cuenta que es una ecuación que está en función de muchas variables que no se pueden controlar (contaminantes y meteorología) y son cambiantes en el tiempo puede generar imprecisión, otros ítems que pueden generar imprecisión son que debido a que es una función obtenida por medio de ensayos experimentales los valores obtenidos no serán iguales, el proyecto no trabaja con un aluminio de alta pureza sino una aleación silicio-magnesio (aleación de aluminio 6061) y la regresión de datos no es del todo buena ($R^2 = 0,74$), todos estos factores tenidos en cuenta pueden afectar el valor real, pero darán una idea del comportamiento que se obtendrá realmente (Kucera, 2020).

4.3.2. Estimación de la velocidad de corrosión por norma ISO 9223 del 2012

En la **tabla 13** se presentan el valor de velocidad de corrosión estimado empleando la función dosis-respuesta de la norma ISO 9223 del 2012 (**ecuación 3 y ecuación 4**), luego de que las muestras fueron expuestas atmosféricamente durante un año.

Tabla 13: Valor de velocidad de corrosión estimado según ISO 9223 del 2012.

LUGAR	V_{corr} (g/(m ² .año))
UTB	4,9
COTECMAR	6,7
MAYOR	7,0

Para poder utilizar la función dosis-respuesta (**ecuación 3 y ecuación 4**) se requiere tener a la mano datos meteorológicos y de contaminantes del aire (**Tabla 14**), sin dejar a un lado los tiempos de exposición de las muestras. Los datos de temperatura y humedad relativa fueron tomados de las bases de datos del Dimar (Dirección General Marítima, 2013) ya mencionados en la sección de consulta de información meteorológica del proyecto, tomando como referencia los años 2016 y 2017 (años en que fueron expuestas las muestras), en cuanto a los datos de contaminantes del aire, los cloruros son datos censados por el actual proyecto, mientras que el dióxido de azufre se tomó del año 2010 (ResearchGate, 2010) presentado en mayor detalle en la sección de consulta de información de contaminantes del aire. En resumen, los datos de velocidad de corrosión expuestos en la **tabla 13** fueron calculados al reemplazar en la **ecuación 3 y ecuación 4** los valores meteorológicos y de contaminantes presentados en la **tabla 14**.

Tabla 14: Datos meteorológicos y de contaminantes para función dosis respuesta de 9223 del 2012.

		UTB	Cotecmar	Mayor
Contaminantes del aire	Cl (mg/m ² .dia)	53,4	91,0	117,5
	SO ₂ (mg/m ² .dia)	2,1	2,7	0,4
Datos meteorologicos	Temperatura (°C)	28,6	28,6	28,6
	Humedad relativa (%)	84,4	84,4	84,4

Si se observa la **Tabla 11** y la **Tabla 13**, se ve un comportamiento similar, teniendo como el sitio de mayor ataque el Colegio Mayor de Bolívar, seguido de Cotecmar y la Universidad Tecnológica de Bolívar, aunque los valores de la **Tabla 13** sean un poco mayores la tendencia es semejante. Al emplear la función dosis respuesta de la norma ISO 9223 del 2012 el factor de concentración de los cloruros define en gran parte la velocidad de corrosión, al igual que la función dosis-respuesta planteada por Kucera.

Se reitera una función dosis-respuesta permite estimar el valor de la velocidad de corrosión, y a pesar que sea un valor aproximado, brinda una primera información del ataque sobre el material. comparando los tres sitios de prueba (Colegio Mayor de Bolivar, Cotecmar y Universidad Tecnológica de Bolívar), debido a que como se mencionaba anteriormente, se hace una estimación sobre valores cambiantes en el tiempo (contaminantes del aire y meteorología) y no se trabaja directamente sobre un aluminio puro sino con una aleación de aluminio silicio-magnesio, además de esto, la regresión de datos de la función dosis-respuesta de la ISO 9223 de 2012 es menor en comparación a la de Kucera ($R^2 = 0,65$), lo que afecta aún más el valor real de la velocidad.

4.3.3. Velocidad de corrosión por decapado químico.

En la **tabla 15** se observan las velocidades de corrosión en (g/(m²*año) y las pérdidas de masa (g) de los tres lugares especificados en el proyecto para diferentes tiempos de exposición. Todos los datos fueron obtenidos con el procedimiento de decapado químico.

Tabla 15: Velocidades de corrosión y pérdidas de masa.

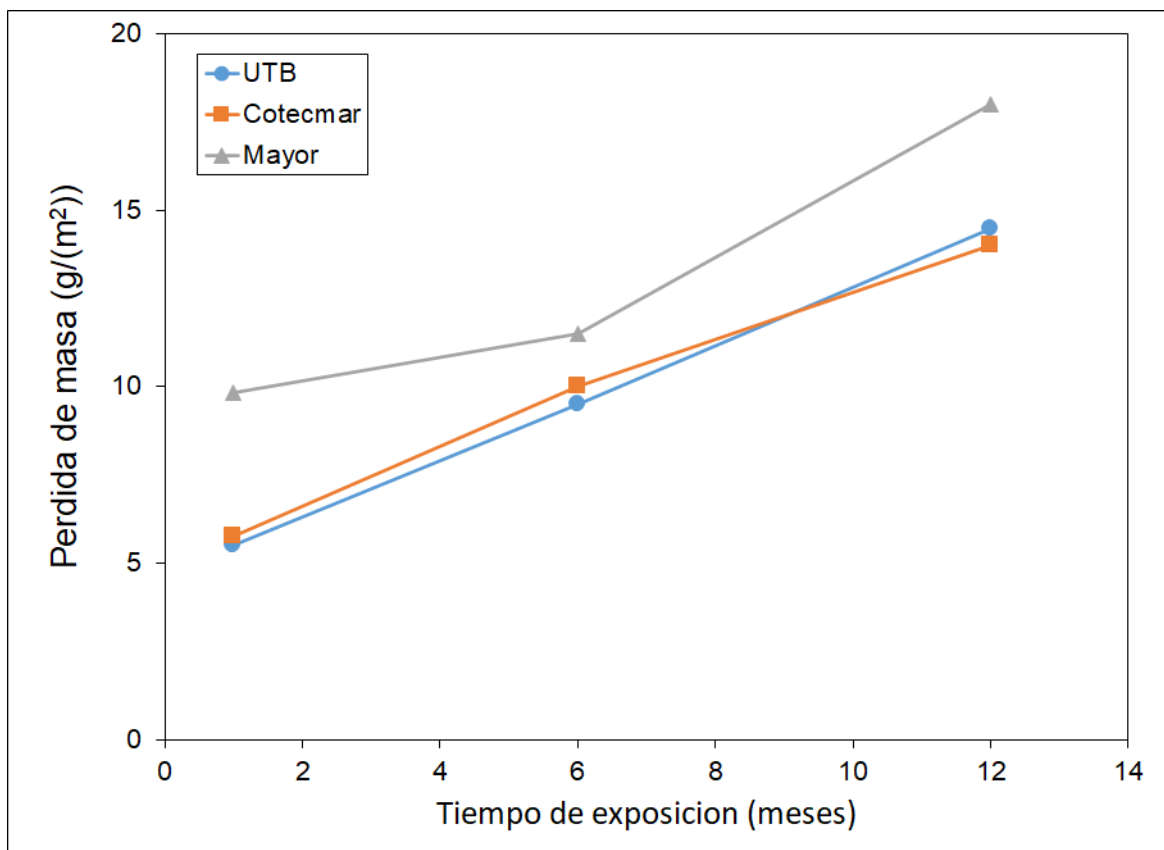
Tiempo	Velocidad de corrosión (g/m ² .año)			Pérdida de masa (g/(m ²))		
	UTB	Cotemar	Mayor	UTB	Cotemar	Mayor
1	66,0	69,0	118,0	5,5	5,8	9,8
6	19,0	20,0	23,0	9,5	10,0	11,5
12	14,5	14,0	18,0	14,5	14,0	18,0

La **figura 10** indica que la pérdida de masa de la aleación 6061 es similar para los sitios de Cotecmar y UTB, a diferencia de las muestras expuestas en el Colegio Mayor de Bolívar, que presenta un mayor ataque respecto a los otros dos sitios, este ataque se da debido a que es el lugar que cuenta con mayor concentración de cloruros como lo muestra la **tabla**

9, estos cloruros tienden a generar un ataque localizado destruyendo la película de óxido natural (para el caso de la aleación de aluminio 6061 llamada capa nativa), por lo tanto tienden a causar corrosión por picadura y con esto se ocasiona una mayor pérdida de masa. Además de que los cloruros causan corrosión por picadura, también tienden a generar degradación superficial.

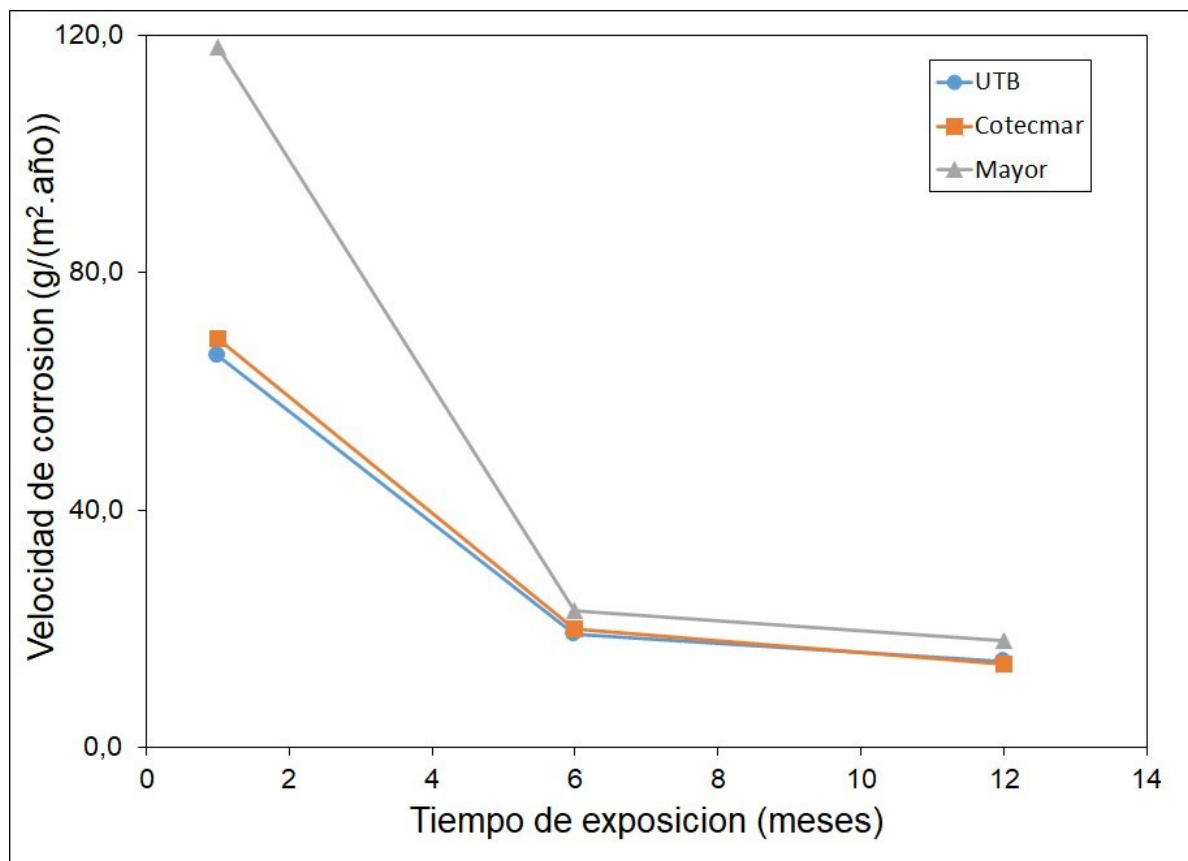
La pérdida de masa en el Colegio Mayor de Bolívar presenta un aumento con el tiempo de exposición (**figura 10**), donde se observa un incremento de la pérdida de masa mayor entre 6 y 12 meses en relación con el aumento entre 1 y 6. El mayor aumento de pérdida de masa de 6 a 12 meses puede ser asociado a un mayor ataque del material debido a la mayor cantidad de cloruros en el ambiente por la cercanía de la zona amurallada al mar. En el caso de UTB y Cotecmar (zona centro de la ciudad y zona industrial mamonal, respectivamente), la pérdida de masa presenta tendencias muy similares, con magnitudes y pendientes parecidas como se observa en la **figura 10**, en los cuales se presenta un nivel similar de los contaminantes que afectan la corrosión, como es el caso del dióxido de azufre (SO_2) y los dióxidos de nitrógeno (NO_2) presentado en la **figura 9**.

Figura 10: Pérdida de masa de las muestras en los tres lugares de exposición a 1, 6 y 12 meses.



En la **figura 11** se puede observar la velocidad de corrosión en $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{año})$ de las muestras expuestas en los tres sitios diferentes de la ciudad de Cartagena de Indias a periodos de tiempo de 1, 6 y 12 meses, estos datos son obtenidos por medio del procedimiento de decapado químico. Todas las muestras presentan un comportamiento similar donde se evidencia la disminución de la velocidad de corrosión con el tiempo de exposición, donde la mayor disminución de velocidad de corrosión se da en el periodo entre 1 y 6 meses, indicando que el producto formado sobre la superficie del material disminuye el ataque posterior de manera importante durante este tiempo, y posteriormente en el periodo de tiempo entre 6 y 12 meses el valor continúa disminuyendo aunque con una ligera variación en el valor. La velocidad de corrosión depende en gran parte de las condiciones ambientales y productos de corrosión formados, por lo que esto puede explicar los altos valores luego de un mes de exposición, donde se inicia la formación del producto de corrosión sobre la superficie de la aleación de aluminio 6061. Teniendo en cuenta la **ecuación 5**, se sabe que el área superficial de las muestras es una constante (50 cm^2), la pérdida de masa es una variable directamente proporcional a la velocidad de corrosión y el tiempo de exposición es una variable inversamente proporcional, el alto valor de la V_{corr} se debe a la elevada pérdida de masa en el primer mes de exposición.

Figura 11: Velocidad de corrosión calculada por decapado químico para 1, 6 y 12 meses.



Si se observa la pérdida de masa entre 1 y 6 meses respecto a la pérdida de masa de 6 a 12 meses (**Tabla 15**), se puede ver que es mayor en el último intervalo de tiempo mientras

que los rangos de tiempo son similares (mes 1 a mes 6, mes 6 a mes 12), lo que explica que el cambio de pendientes de la **figura 11** este regido en mayor parte al aumento de producto de corrosión formado (la velocidad de corrosión disminuye en menor proporción de 6 a 12 meses).

Como se explicaba anteriormente, la velocidad de corrosión se rige en mayor parte por aspectos ambientales y de producto de corrosión formado, pero a la vez, el último mencionado está regido en parte por cloruros y compuestos de azufre como el SO₂ presentes en el ambiente, por esta razón, se puede ver en la **figura 11** que los lugares de UTB y Cotecmar presentan un comportamiento similar, debido a que la concentración de SO₂ es similar en estos dos lugares (**figura 9**), independientemente que en la **figura 9** se observa que los valores de SO₂ para Colegio Mayor de Bolívar sean menores, este presenta un mayor ataque debido a la concentración de cloruros (**Tabla 9**) y se ve que tanto su pérdida de masa como velocidad de corrosión serán mayores respecto a los otros dos lugares (**Figuras 10 y 11**).

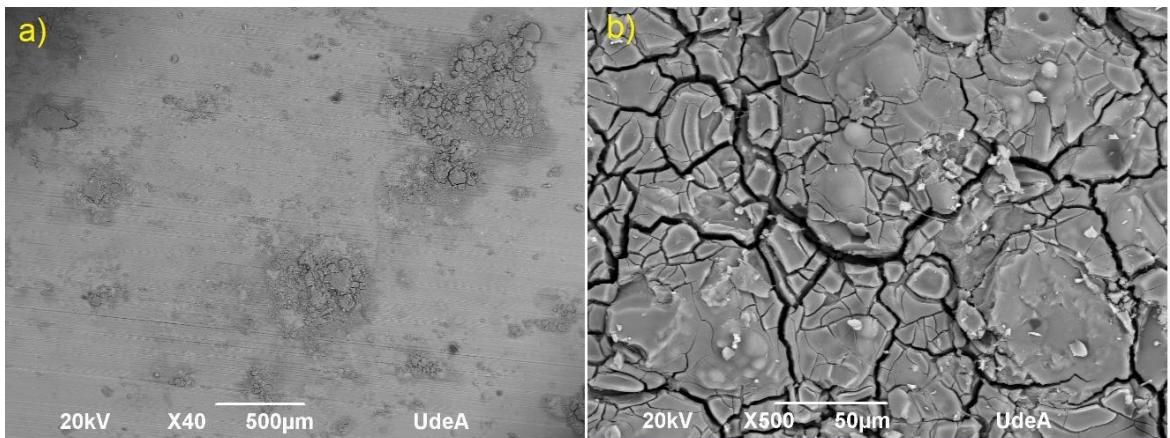
Las muestras fueron expuestas en abril del 2016, los retiros para los análisis se realizaron en mayo de 2016 (para primer mes), octubre de 2016 (para 6 meses) y por último abril de 2017 (para 12 meses), si se comparan los datos obtenidos en la **figura 10** respecto a los datos meteorológicos de la (**figura 7, tabla 12 y tabla 14**), se puede ver que las condiciones a las que fueron sometidas las muestras fueron moderadamente exigentes (la temperatura de 2016 es la mayor después de la del 2015 y la precipitación promedio mayor es de 2016), Las dos variables pérdida de masa y velocidad de corrosión presentan comportamientos distintos aun siendo directamente proporcionales, esto es debido a que independientemente que aumente la pérdida de masa, el tiempo de exposición también aumentará de tal forma que disminuirá el valor de la velocidad de corrosión en la **ecuación 5**.

Se resalta que los valores obtenidos por decapado químico indican el comportamiento del material en cada sitio evaluado debido a que se está trabajando directamente sobre las muestras de estudio. No obstante, se puede observar que las funciones dosis-respuesta (ICP materials e ISO 9223 del 2012), cumplieron con el objetivo de prever el ataque a las muestras por medio de la estimación de velocidad de corrosión, mostrando el mismo comportamiento que el decapado químico, en el cual se ve que las velocidades de corrosión más altas se presentan en Colegio Mayor de Bolívar, seguido de UTB y Cotecmar. Se debe especificar que esta velocidad de corrosión por decapado químico brinda valores cuantitativos de la velocidad promedio, debido a que se basa en un principio de pérdida de masa durante un determinado tiempo, a diferencia de la estimación de velocidad de corrosión por resistencia de polarización, que permite determinar la velocidad de corrosión instantánea.

4.4. Microscopía electrónica de barrido (MEB)

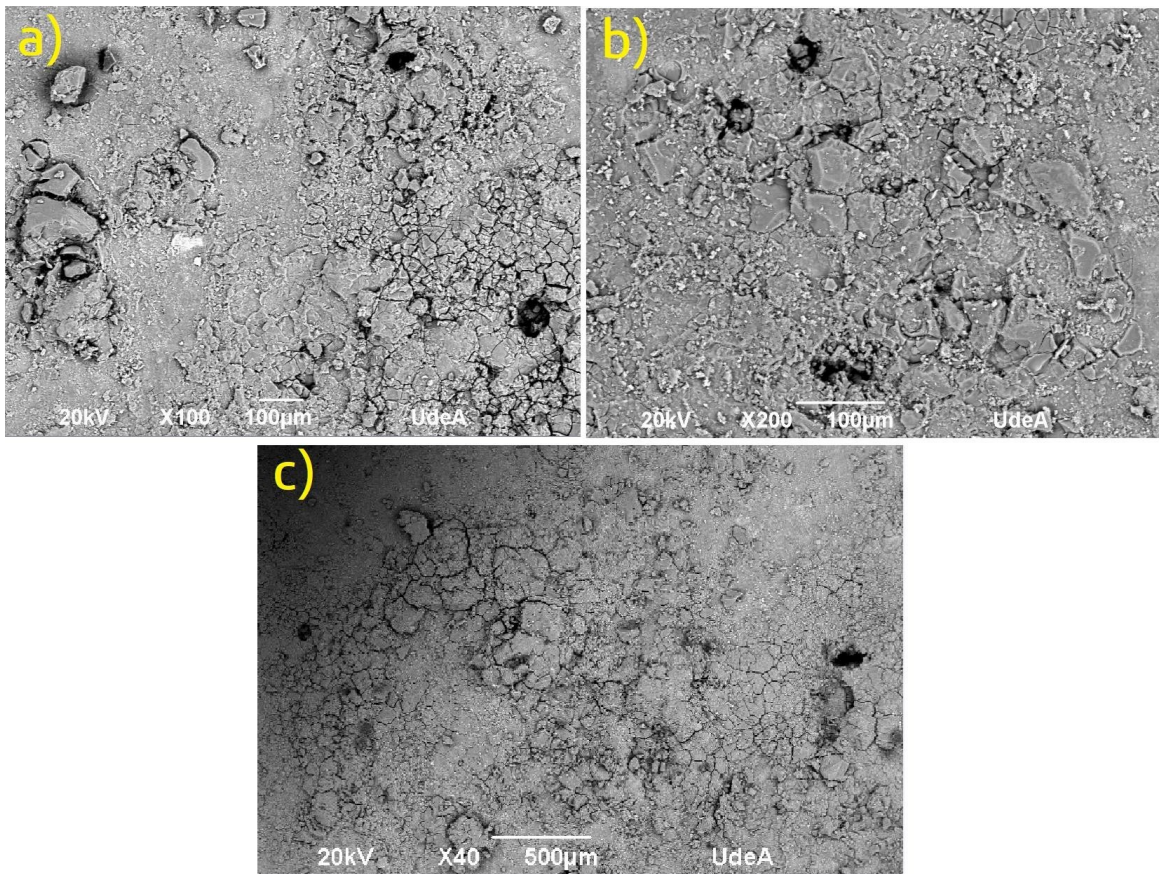
Microscopía electrónica de barrido fue empleada para evaluar la morfología superficial del producto de corrosión formado sobre la aleación de aluminio 6061. Imágenes obtenidas de la aleación luego de un año de exposición a la atmósfera en los tres sitios de estudio: Universidad Tecnológica de Bolívar, Colegio Mayor de Bolívar y Cotecmar se presentan en las Figuras 12, 13 y 14, respectivamente. Las imágenes de la superficie muestran la existencia de microgrietas en el producto de corrosión y corrosión por picadura que se presenta en aleaciones del aluminio expuestas a ambientes costeros, aunque se observan diferencias en la morfología entre los sitios de exposición.

Figura 12: Imágenes capturadas por medio de MEB para UTB (universidad tecnológica de Bolívar) a los 12 meses de exposición.



La **figura 12.a** muestra una acumulación de material en zonas localizadas donde a la vez se observa la presencia de picado sobre la superficie de material. En la literatura se reporta que se ha demostrado la linealidad del aumento de densidad por picadura especialmente en atmósferas que contienen azufre y cloruros (Vera, 1988) . Por otra parte, la **figura 12.b** muestra un agrietamiento de la superficie del producto de corrosión formado en la aleación de aluminio 6061, lo cual se asocia al proceso cíclico de mojado y secado de la capa del producto de corrosión en el tiempo de exposición que ocasiona tensiones en la misma y conlleva a la generación de grietas (Cui, 2015). En adición, la variación de temperaturas y condiciones ambientales a las cuales puede estar sometido el material hace que esté presente dilataciones constantes lo cual lo puede llevar a la fatiga haciendo que se agriete su estructura. Los contaminantes como lo son SO_2 y Cl son los principales causantes de la velocidad de corrosión del material (Yanjie, 2013) y cuando el sulfato tiene presencia en la solución de cloruro la corrosión tiende a ser más agresiva.

Figura 13: Imágenes capturadas por medio de MEB para colegio mayor de Bolívar a los 12 meses de exposición.

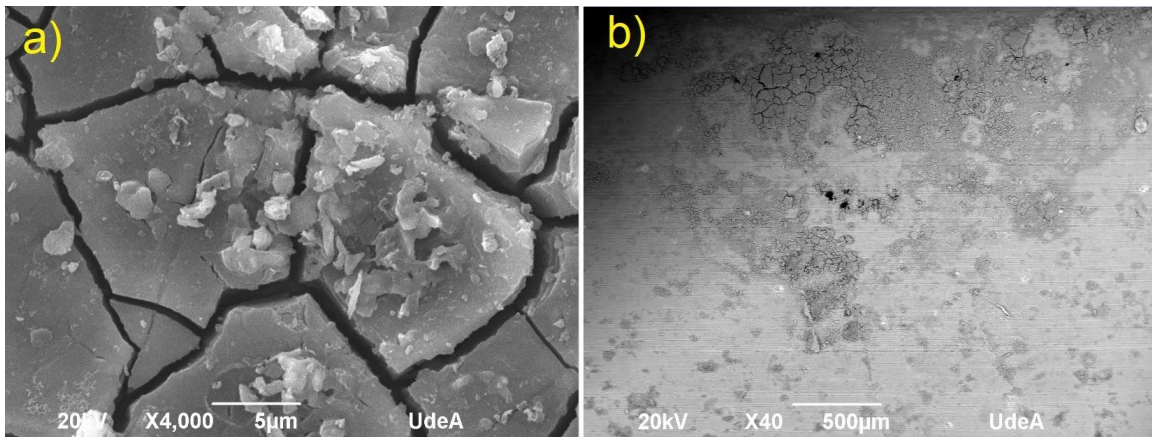


Imágenes MEB de la superficie del producto de corrosión formado en el Colegio Mayor de Bolívar luego de un año de exposición se presentan en la **Figura 13**, donde se observa en general una acumulación del producto de corrosión sobre toda la superficie de la aleación. La imagen obtenida con ampliación de x40 (Figura 13c) muestra que la superficie presenta una mayor cantidad de productos de corrosión, que cubren casi en su totalidad el área total de la imagen. El producto de corrosión en Colegio Mayor de Bolívar (**figura 13c**) es mayor en comparación al observado tanto en la Universidad Tecnológica de Bolívar como en Cotecmar (observar **figura 12a** y **figura 14b**). En las **Figuras 13a** y **13b** con ampliación de X100 y X200() se observa una discontinuidad a nivel superficial del producto de corrosión formado generando grietas. En la **figura 13** también es posible ver algunos ataques localizados sobre la muestra (picadura), de hecho, si se comparan la **figuras 12a, 13c** y **14b** se ve que el área de picado sobre la superficie es mayor para la muestra expuesta en Colegio Mayor de Bolívar (**figura 13c**).

La corrosión por picadura es característica de las series de aluminio 6xxx (Bril, 2001)(Davis, 1993) y teniendo en cuenta que esta se debe en gran parte a los cloruros (Liu & Zhang, 2014)(Yanjie, 2013), se justifica que la muestra de Colegio Mayor de Bolívar cuente con la

mayor área de picado (la deposición de cloruros es mayor en el Colegio Mayor de Bolívar según la **tabla 9**). En cuanto a los productos de corrosión formado, estos se deben en su mayoría a compuestos de azufre e hidroxicloruros (Yanjie, 2013), siendo congruente con la información de cloruros expuestos en la **tabla 9** (el lugar de Colegio Mayor de Bolívar cuenta con la mayor deposición de cloruros), ya que se logra observar en las **figuras 12, 13 y 14** que la mayor formación de producto de corrosión se da en Colegio Mayor de Bolívar, lo cual es congruente con los valores de pérdida de masa y velocidad de corrosión presentados en las **Figuras 10 y 11**.

Figura 14: Imágenes capturadas por medio de MEB para Cotecmar a los 12 meses de exposición.



En la **figura 14** se observa acumulación de productos de corrosión sobre superficies localizadas del metal. Comparando la **figura 14b** con la **figura 13c** con una ampliación a x40, se puede ver que para Cotecmar (**figura 14b**) tanto el área de picado como los productos de corrosión formados son menores. Al igual que la **figura 12b** para la Universidad Tecnológica de Bolívar, la **figura 14a** para Cotecmar también presenta grietas que se pueden asociar al proceso cíclico de mojado y secado de la capa formada por los productos de corrosión (Cui, 2015), por último, la **figura 13** para Colegio mayor de Bolívar no cuenta con una imagen de gran ampliación que permita observar que se presentan este tipo de grietas, aunque se pueden estar formando debido a las condiciones ambientales.

A partir de la corrosión presentada en las muestras para los tres sitios de exposición en un año, se puede ver superficialmente que el producto de corrosión formado es mayor para Colegio Mayor de Bolívar (**figura 13c**) seguido de Cotecmar y la Universidad tecnológica de Bolívar (**figuras 14b y 12a**, respectivamente), esto podría tener relación con la deposición de cloruros y concentración de sulfatos en los tres lugares de exposición (**tabla 9 y figura 9**)(Yanjie, 2013). En cuanto a picadura se refiere, también se observa que el ataque es más fuerte en el Colegio mayor de Bolívar (**figura 13c**) seguido de Cotecmar y UTB (**figuras 14b y 12a**, respectivamente) puesto que la velocidad de corrosión es proporcional a la deposición de cloruros.

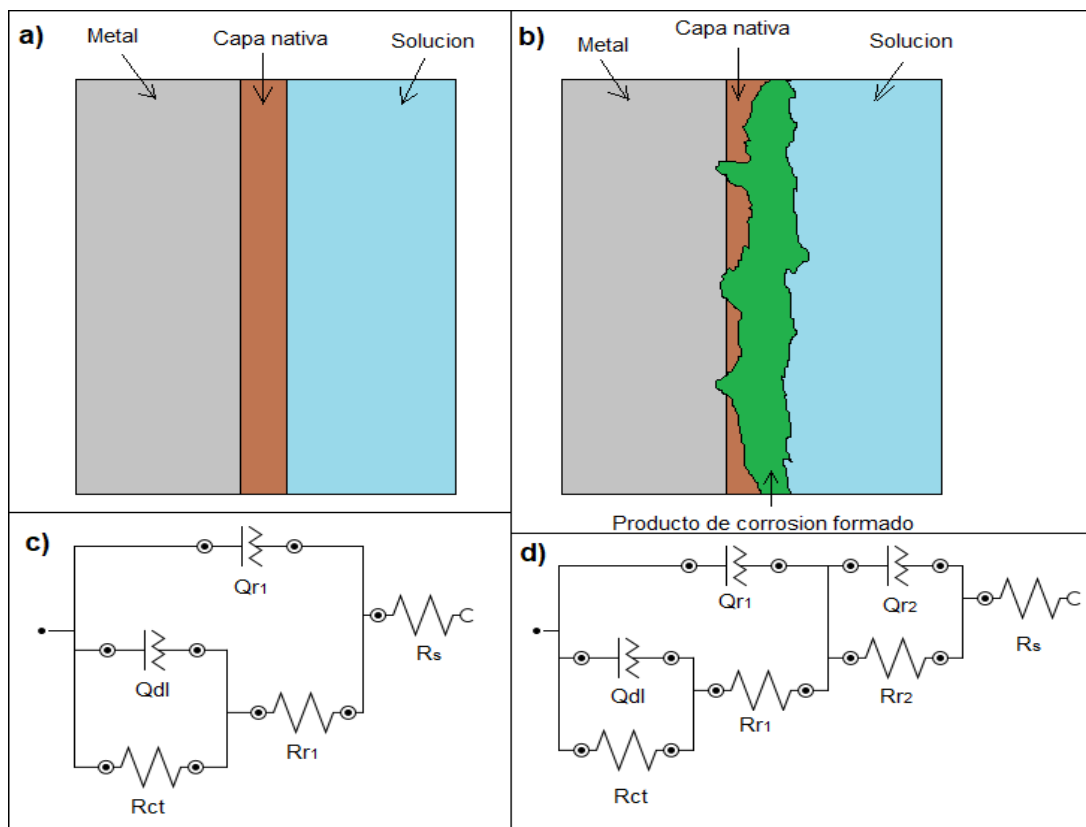
4.5. Análisis por medio de EIS

4.5.1. Circuitos para elaborar los ajustes de espectros de EIS en software Nova (versión 1.11)

Para realizar los ajustes de los espectros de impedancia electroquímica (EIS), se tomaron como base los circuitos de la **figura 6a** y la **figura 6b**, debido a que por medio de estos se generaba un menor error entre los datos experimentales y los simulados por medio de circuito equivalente en el software nova, cabe resaltar el circuito mostrado en la **figura 15c** se utiliza para las muestras sin exponer y el circuito de la **figura 15d** para las muestras expuestas a 1, 6 y 12 meses, asumiendo que el producto de corrosión formado se da sobre la capa nativa como se muestra en la **figura 15b** (Liu & Zhang, 2014).

El circuito equivalente es un medio con el cual se busca un buen ajuste sobre la interfaz de la prueba de EIS (Metrohm Autolab B.V., s.f.), independientemente de que el producto de corrosión formado sea uniforme o localizado.

Figura 15: Circuitos empleados para ajustar los espectros de EIS en software nova.



El número de elementos de fase en un circuito equivalente aumenta la complejidad del ajuste de la interfaz, la cual varía su comportamiento en función del tiempo ya que en el

transcurso de la exposición, el material comienza a presentar ciertas características como lo es el picado y el producto de corrosión formado, los cuales hacen que la interfaz tenga un comportamiento particular donde el primer circuito no logra ajustar los datos experimentales para los tiempos de exposición de 1, 6 y 12 meses, por lo tanto se opta por el segundo, más sin embargo a partir del artículo (Liu & Zhang, 2014) se entiende que el segundo circuito se suele emplear para ajustar pruebas tomadas en zonas costeras como lo es Cartagena de Indias.

4.5.2. Ajustes elaborados por medio de circuito equivalente en software nova para UTB.

Las **figuras 16, 17 y 18** muestran el ajuste de los espectros de impedancia electroquímica (EIS) realizados por medio de circuito equivalente (circuitos establecidos en las **figuras 15c y 15d**) en el software Nova (versión 1.11), en las figuras mencionadas inicialmente se puede ver que el comportamiento del ángulo de fase, módulo de impedancia y Nyquist cambian significativamente si se comparan las probetas de tiempo de exposición 0 meses con las probetas luego de estar expuestas por 12 meses, lo que da a entender que se altera el comportamiento corrosivo sobre las muestras. Exportando los datos experimentales a excel junto con los datos de ajuste de circuito equivalente, se puede ver que los dos generan tendencias similares en rangos de frecuencias e impedancias, lo que da a entender que los datos obtenidos por medio de los ajustes de circuito equivalente son adecuados.

Los datos experimentales se presentan tal cual como fueron obtenidos de las corridas sobre las muestras (no se eliminan datos dispersos, como en la **figura 16a** a bajas frecuencias (0,01 Hz a 1 Hz)), aun así, estos datos son los mejores obtenidos sobre las muestras (la mejor muestra de tres) según el parámetro de Kronig-Kramers ejecutado en Nova, el cual indica la calidad de los datos obtenidos experimentalmente.

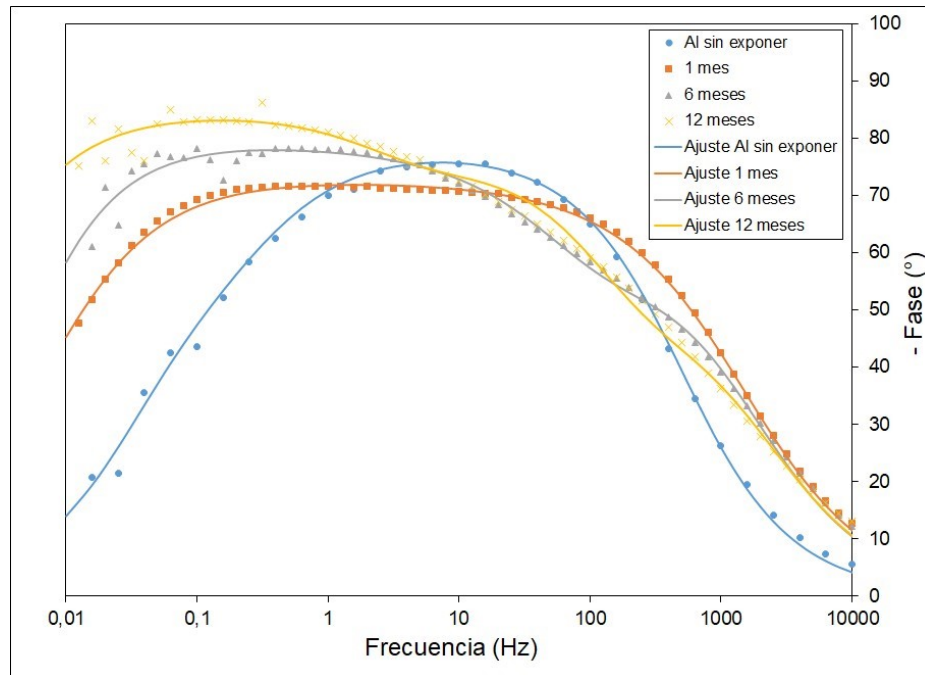
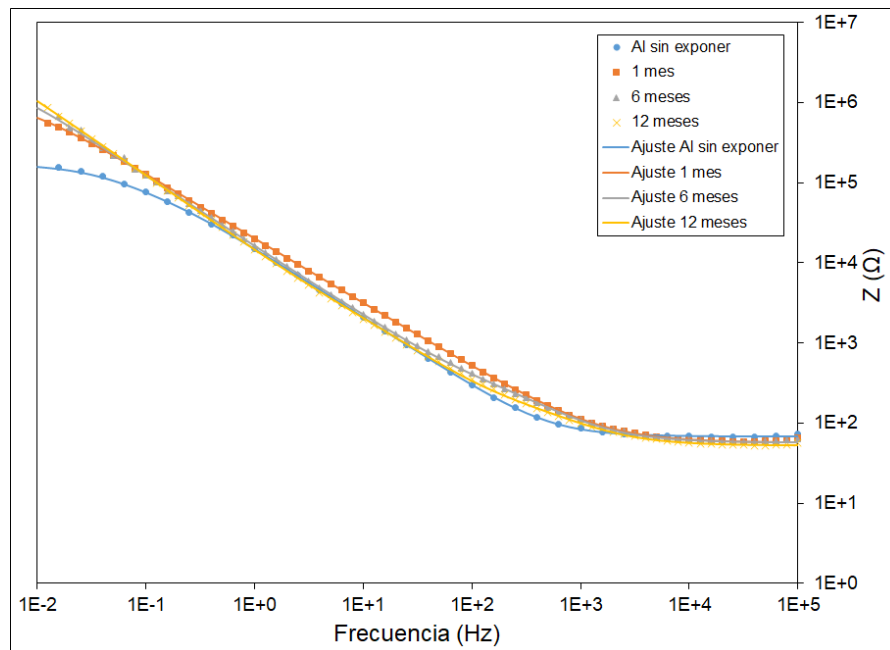
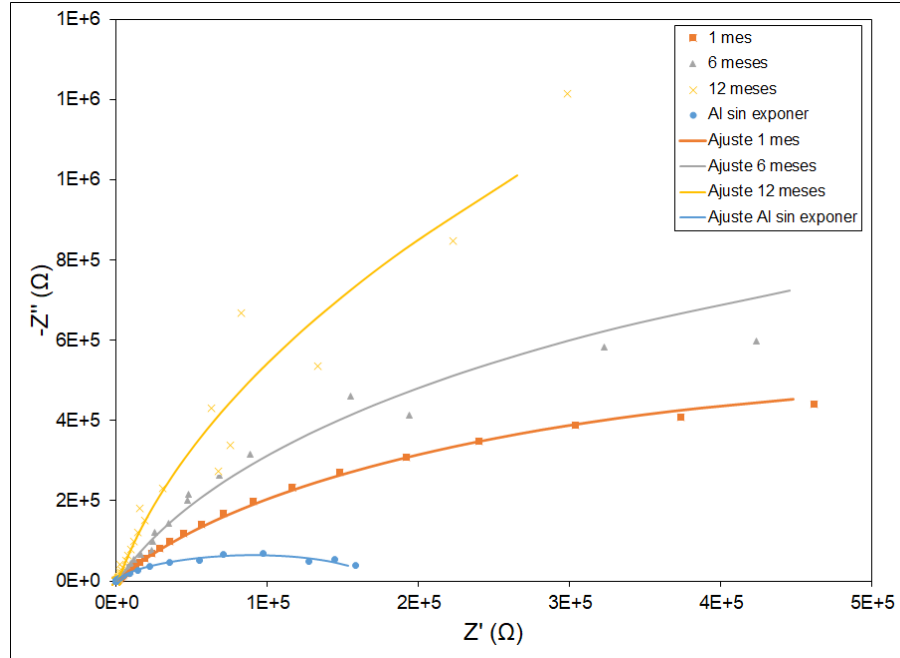
Figura 16: Ajustes EIS UTB**Figura 16.a:** Ajuste de ángulo de Fase UTB**Figura 16.b:** Ajuste de módulo de impedancia para UTB.

Figura 16c: Ajuste de Nyquist para UTB.

En el gráfico de Nyquist se observa que hay un aumento de impedancia respecto al tiempo de exposición de las muestras de 1 a 6 meses, esto da a entender que las propiedades de resistencia a la corrosión aumentan a largo plazo, por ende reducen la velocidad de corrosión del material, por otro lado, si se observa el ángulo de fase respecto a la frecuencia del sistema, es posible ver claramente a mediana frecuencia el ángulo de la corriente respecto al voltaje tiende a acercarse a los -90° lo cual significa que la impedancia presente es de tipo capacitiva y con una resistencia en paralelo podría dar un acercamiento a describir características de algunas capas formadas sobre el material. En cuanto a la gráfica de módulo de impedancia se puede ver un aumento de la magnitud de la impedancia del sistema a bajas frecuencias (resistencia de polarización) de 0 a 6 meses de exposición, esto da a interpretar la posibilidad de que se está generando un tipo de producto sobre la superficie de la muestra, el cual puede reducir el ataque sobre la misma, no obstante, se observa disminuir la impedancia a 12 meses de exposición y esto provocaría una mayor disminución de alguna resistencia del sistema. En cuanto a la fase de bode (**Figura 16a**) se puede observar en los datos experimentales de la aleación de aluminio 6061 sin exponer como presenta una tendencia similar a las reportadas en algunos artículos consultados anteriormente (Liu & Zhang, 2014)(Yanjie, 2013) para el aluminio puro, pero cuando se presenta la corrosión los espectros presentan cambios.

4.5.3. Ajustes elaborados por medio de circuito equivalente en software nova para Cotecmar.

Figura 17: Ajustes EIS COTECMAR

Figura 17a: Ajuste de ángulo de fase para Cotecmar.

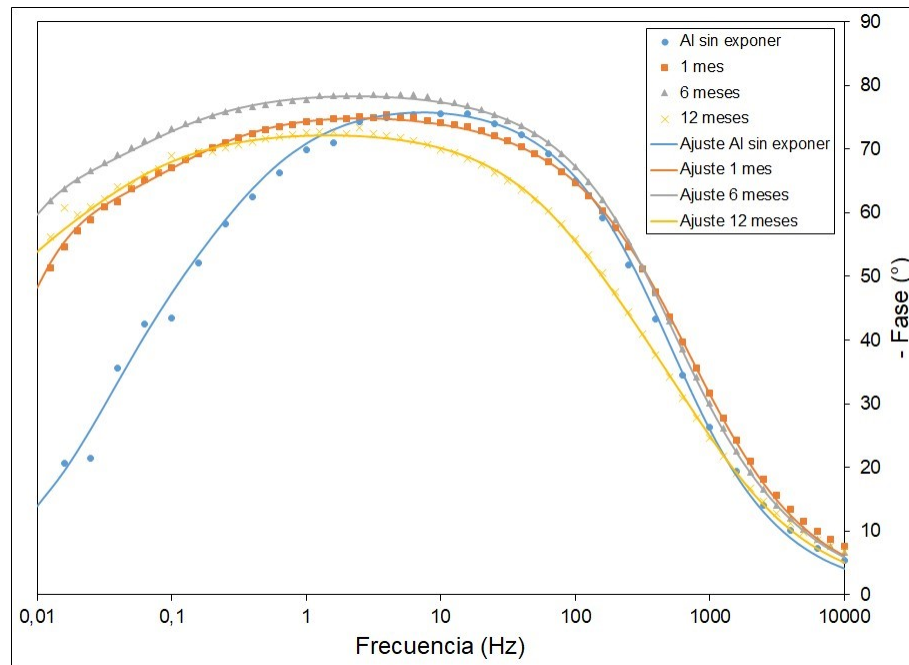


Figura 17b: Ajuste de módulo de impedancia para Cotecmar.

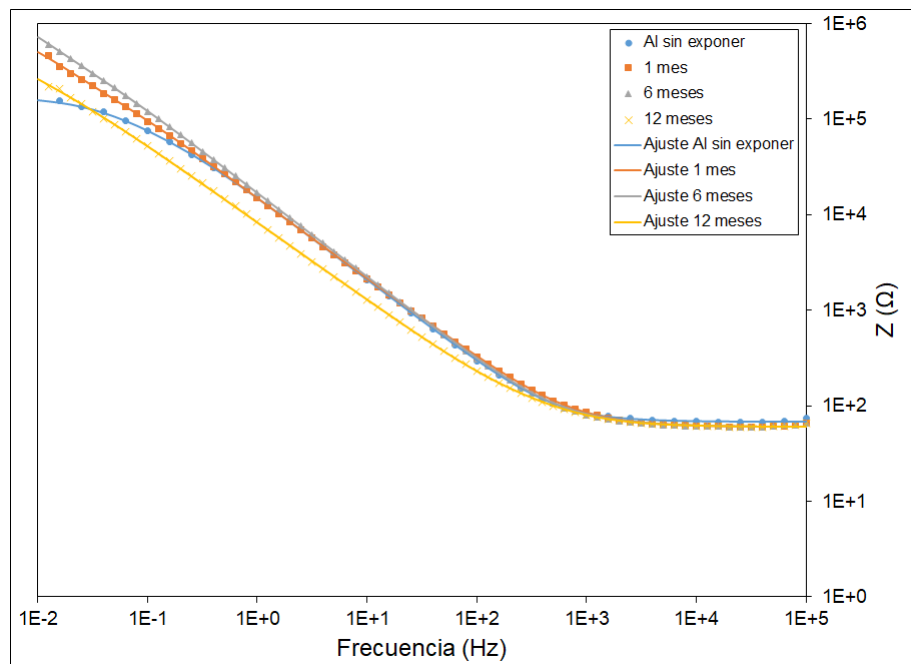
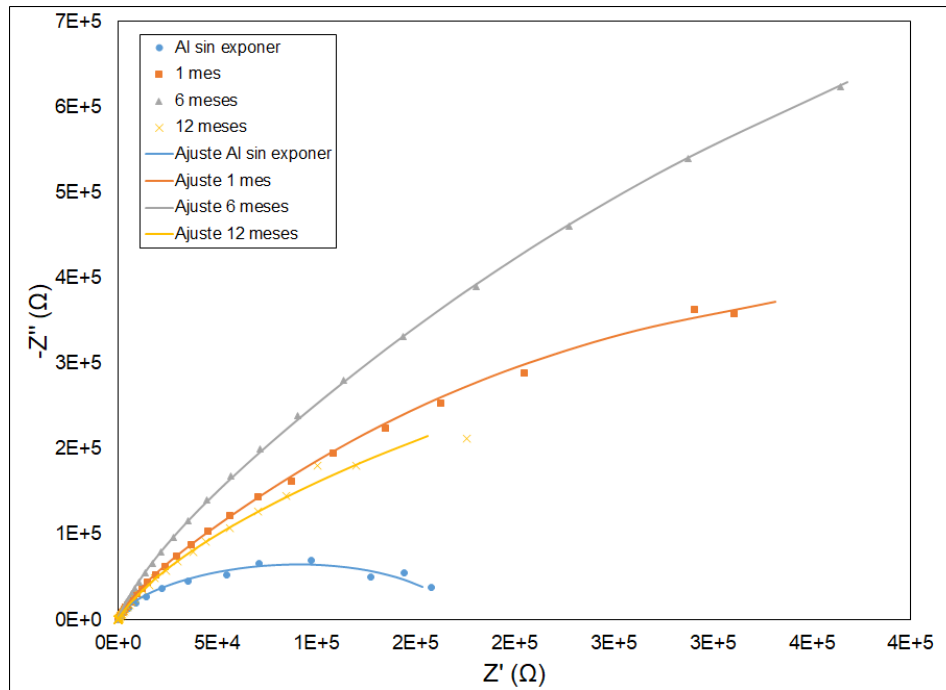


Figura 17c: Ajuste de Nyquist para Cotecmar.

Realizando un análisis cualitativo de los espectros de impedancia electroquímica, se puede observar en la gráfica de Nyquist el aumento de la impedancia respecto al tiempo de exposición, por otra parte con base en las gráficas presentadas es posible visualizar un crecimiento capacitivo en el diagrama de fase de bode a medianas frecuencias, esto puede ser causado por los productos de corrosión formados luego de estar expuesto a la atmósfera durante uno y seis meses, los productos de corrosión normalmente van formando una capas sobre la superficie del material, las cuales hacen ocasionan un aumento en su resistencia a la conductividad eléctrica lo cual es equivalente a decir que su impedancia tiende a crecer como se puede observar en Nyquist y fase de Bode, a partir del módulo de Bode se observa como la velocidad de corrosión va disminuyendo en función del tiempo de exposición pero a sus doce meses de exposición su velocidad de corrosión tiene un crecimiento considerable lo cual se corrobora en fase de Bode, donde la composición capacitiva de la impedancia del sistema a los doce meses de exposición decrece lo cual se interpreta como un desempeño a la corrosión poco efectivo.

4.5.4. Ajustes elaborados por medio de circuito equivalente en software nova para Colegio mayor de Bolivar.

Figura 18: Ajustes EIS Colegio mayor de Bolivar

Figura 18a: Ajuste de ángulo de fase para Colegio mayor de Bolivar.

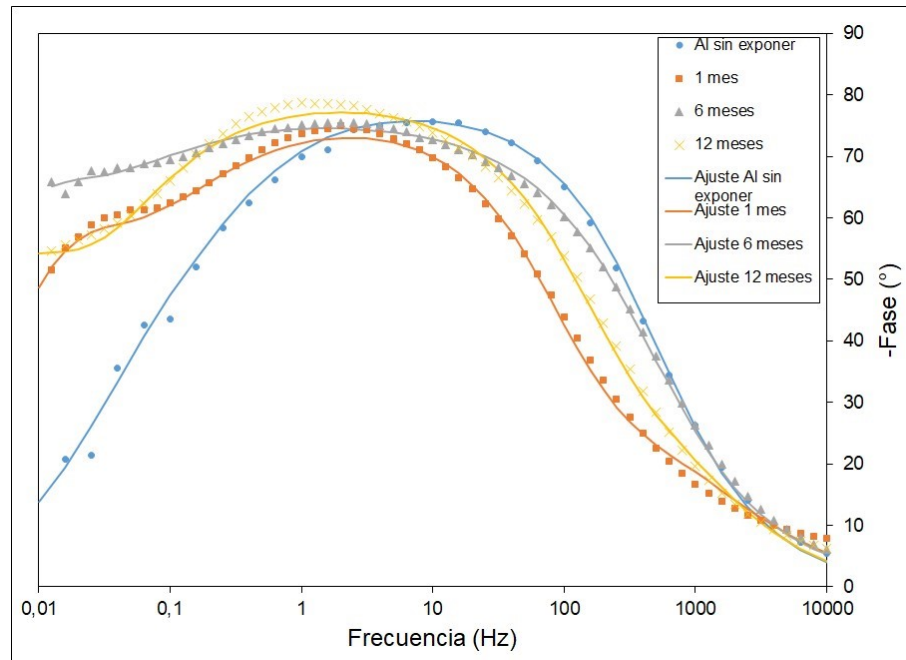


Figura 18b: Ajuste de módulo de impedancia para Colegio mayor de Bolivar.

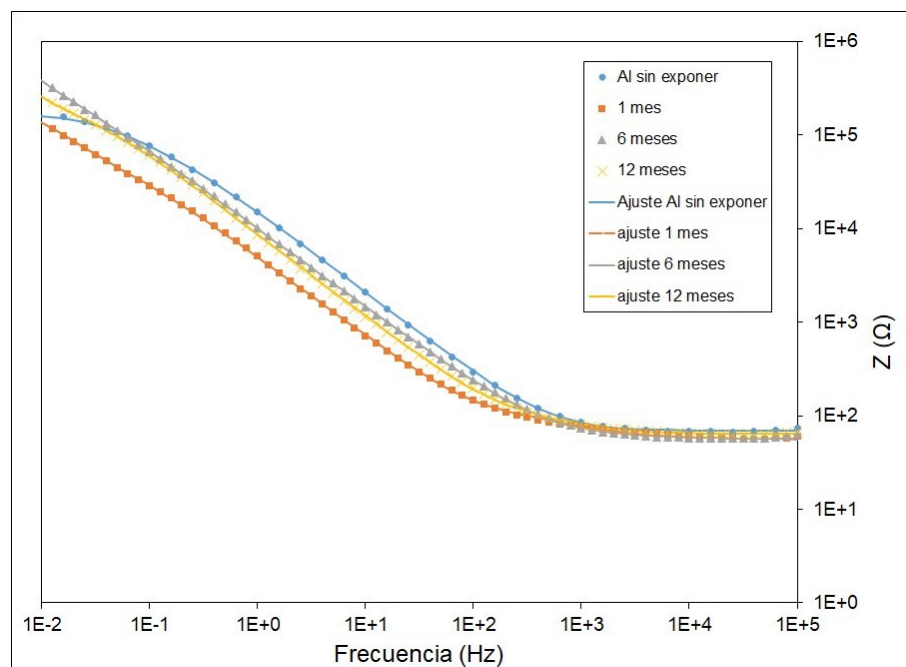
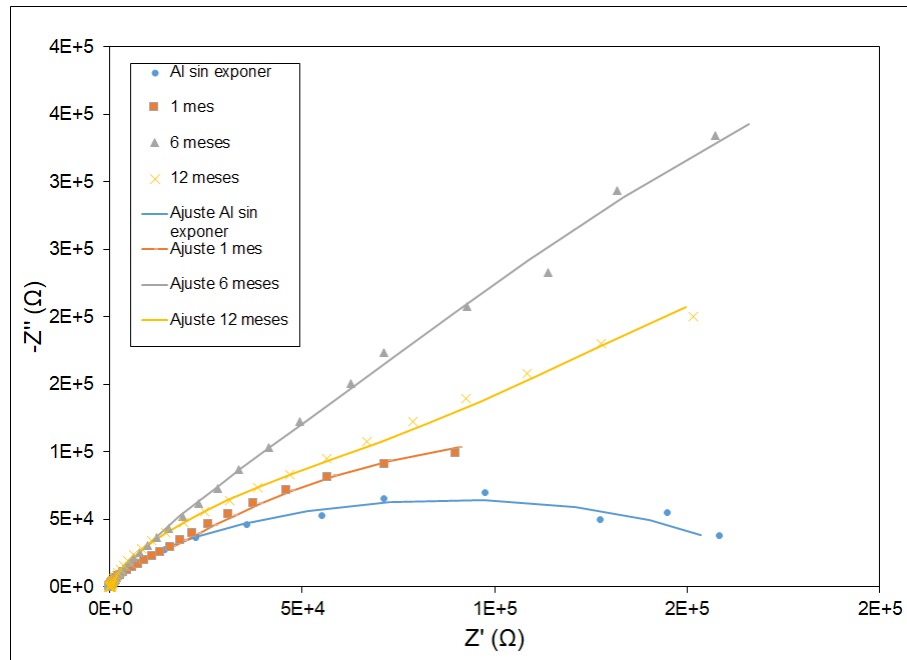


Figura 18c: Ajuste de Nyquist para Colegio mayor de Bolivar.

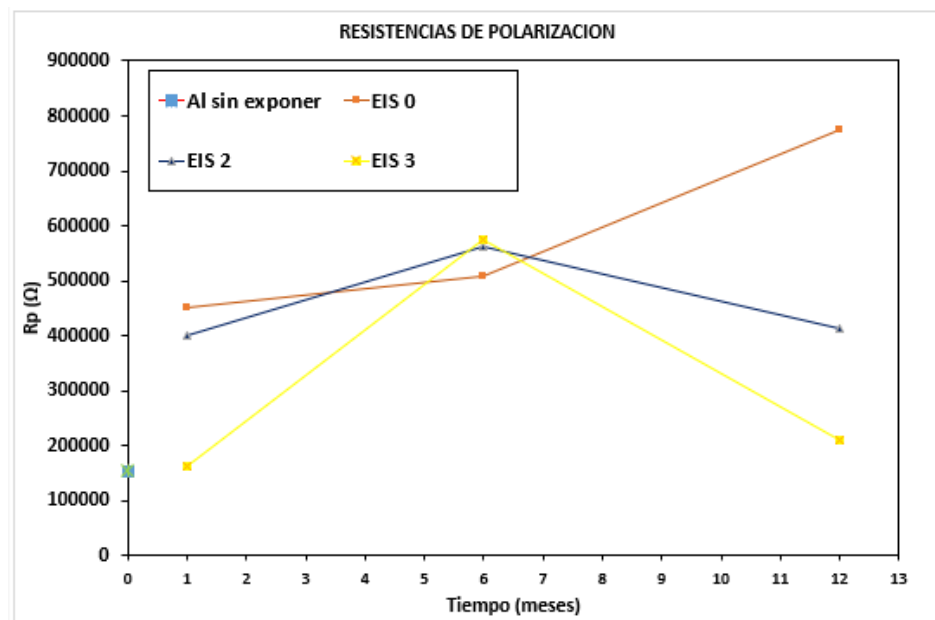
El aumento de impedancia en el lugar tres de exposición es notable en Nyquist al comparar el aluminio sin exponer a un mes de exposición y a seis meses de exposición pero su impedancia en doce meses disminuye lo cual puede ser dado que los productos de formación formados a los 12 meses hayan generado una barra protectora que logró un buen desempeño anticorrosivo. por otra parte el módulo de Bode permite observar que en seis meses la resistencia de polarización se incrementa considerablemente lo cual se interpreta como una disminución de la velocidad de corrosión en la aleación de aluminio 6061, teniendo en cuenta las fases de bode, a medianas frecuencias su impedancia equivalente es muy capacitiva esto quiere decir que tiene un buen desempeño contra la corrosión a dichas frecuencias.

4.5.5. Resistencia de polarización

Tabla 16: Resistencias de polarización en los tres sitios de exposición.

R_p EIS sin exponer	R_p EIS 0
$R_{p\ 0\ meses} = 153617,40\ \Omega$	$R_{p\ 1\ mes} = 450868,54\ \Omega$
	$R_{p\ 6\ meses} = 509221,20\ \Omega$
	$R_{p\ 12\ meses} = 775435,61\ \Omega$
R_p EIS 2	R_p EIS 3
$R_{p\ 1\ mes} = 399917,94\ \Omega$	$R_{p\ 1\ mes} = 162000,15\ \Omega$
$R_{p\ 6\ meses} = 562955,49\ \Omega$	$R_{p\ 6\ meses} = 575716,00\ \Omega$
$R_{p\ 12\ meses} = 414386,12\ \Omega$	$R_{p\ 12\ meses} = 210591,88\ \Omega$

Figura 19: Resistencias de polarización en los tres sitios de exposición.



En la **figura 19** es posible ver el comportamiento de las resistencias de polarización para la Universidad Tecnológica de Bolívar (EIS 0), zona mamonal (EIS 2), colegio mayor de bolívar (EIS 3), la resistencia de polarización es la diferencia de la impedancia de alta frecuencia con la impedancia de baja frecuencia como lo muestra la **ec.13**, la resistencia de polarización característicamente se puede analizar a partir de los diagramas de fase de bode en el cual su pendiente es proporcional a la resistencia de polarización, la cual a su vez es inversamente proporcional a la velocidad de corrosión del material, es decir, si la resistencia de polarización aumenta entre dos tiempos quiere decir que la velocidad de

corrosión disminuye en dicho intervalo de tiempo y si por lo contrario, la resistencia disminuye, quiere decir que la velocidad de corrosión en la aleación aumenta.

La **figura 19** y la **tabla 16** muestran que la Universidad Tecnológica de Bolívar es donde la aleación de aluminio 6061 tiene una mayor resistencia de polarización seguido por Cotecmar y el colegio mayor, lo cual quiere decir que la velocidad de corrosión es mayor en el colegio mayor seguido por mamonal y por último la universidad tecnologica de bolivar. En el transcurso de uno a seis meses la velocidad de corrosión para el colegio mayor y la zona de mamonal disminuyen pero más drásticamente en el colegio mayor de bolívar, para el caso de la universidad tecnologica de bolivar la velocidad de corrosión aumenta, en el intervalo de seis a doce meses la velocidad de corrosión para el colegio mayor y la zona mamonal la velocidad de corrosión tienen un aumento pero más severamente en el colegio mayor de bolívar y para la universidad tecnologica de bolivar la velocidad disminuye considerablemente.

Luego de doce meses de exposición de las muestras de la aleación de aluminio 6061 en los tres lugares nombrados durante el transcurso del documento es posible ver como la velocidad de corrosión es mayor para los sitios que se encuentran mas cercanos al mar, para este caso de menor a mayor distancia están el Colegio mayor de Bolivar, Cotecmar, Universidad Tecnológica de Bolívar respectivamente, teniendo en cuenta que la concentración de cloruros es menor para los sitios con mayor distancia al mar cómo es posible verlo en la **tabla 9**.

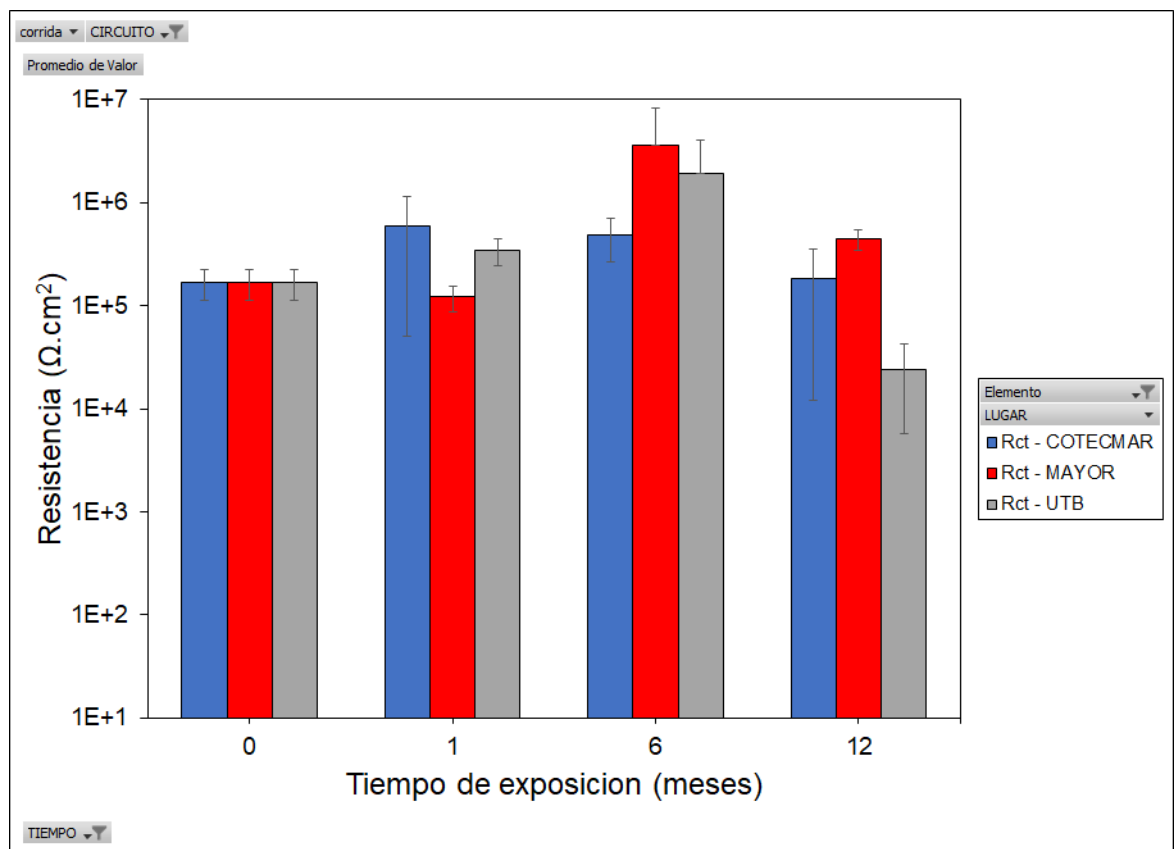
Por otra parte, las imágenes obtenidas a través de MEB **figura 13.c, figura 14.b, y figura 12.a**, imágenes a la misma escala (x40) se puede visualizar que en la muestra expuesta en el colegio mayor de bolívar el picado es más intenso, lo cual se relaciona con la deposición de cloruros la cual tiene un valor mayor en la zona del colegio mayor de bolívar y que a su vez la velocidad de corrosión es proporcional esta deposicion de cloruros (Liu & Zhang, 2014)(Yanjie, 2013) son las de Colegio Mayor de Bolivar.

4.5.6. Comportamiento de las resistencias del circuito equivalente respecto al tiempo de exposición.

Las **figuras 20, 21 y 22** representan el comportamiento de los elementos resistivos empleados para los ajustes por medio de circuito equivalente y software Nova 1.11, estas tendencias se pueden ver respecto al tiempo de exposición de las muestras para los tres lugares, los valores con los cuales se hizo la tendencia de las gráficas para Cotecmar y UTB corresponden al promedio del comportamiento de tres muestras diferentes que se sometieron a las mismas condiciones iniciales, a diferencia de colegio mayor de Bolívar, para el cual solo se tomaron los datos de EIS de dos muestras, calculando el promedio de las muestras usadas, se procede de esta forma, debido a que los espectros de EIS para la tercera muestra de colegio mayor de Bolívar cuentan con una gran dispersión de datos según el análisis de Kronig-Kramers ejecutado en Nova y podrían influir en datos erróneos de los parámetros del circuito equivalente.

El valor de las resistencias calculadas con ayuda del software nova se multiplica por el área de la medida de EIS, la cual tiene un diámetro de 2cm (el área es aproximadamente 3,1416 cm²) para finalmente dejar la resistencia en unidades de $\Omega \cdot \text{cm}^2$.

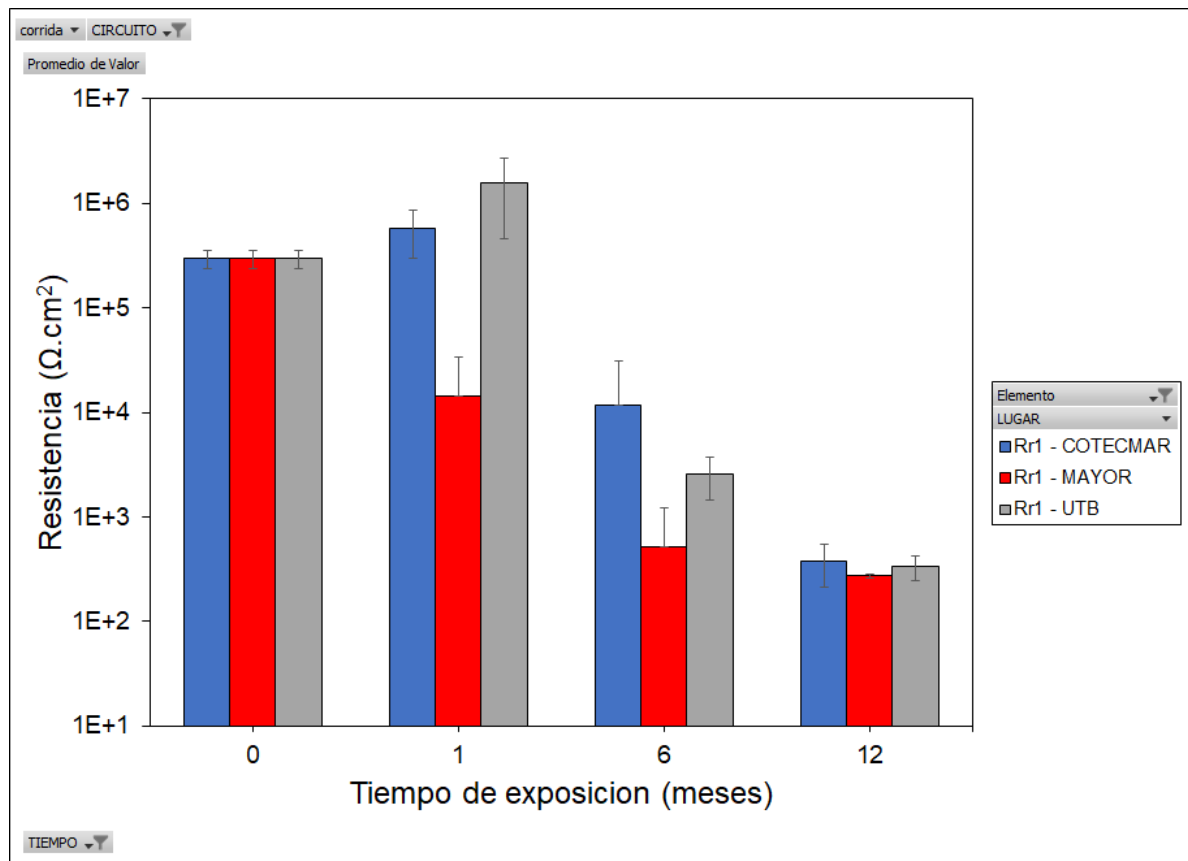
Figura 20: Resistencia de transferencia de carga en los tres sitios de exposición.



Como se observa en la **figura 20** el parámetro de circuito equivalente R_{ct} (resistencia de transferencia de carga) aumenta hasta los 6 meses de exposición de las muestras para los tres lugares, esta puede deberse a los efectos de inhibición que causan las capas de producto de corrosión junto con la capa nativa, pero de 6 a 12 meses disminuye, lo cual puede ser causa del aumento de iones agresivos que promueven la disminución de la resistencia de transferencia de carga en la aleación de aluminio 6061.

Otra forma de explicar la reducción de R_{ct} es observando la disminución de la resistencia de polarización de 6 a 12 meses en los diagramas de módulo de impedancia (**figura 16b** y **figura 17b**) para Cotecmar y colegio mayor de Bolívar, mientras que para UTB el módulo de bode se mantiene casi constante (el aumento es poco), por lo tanto, al disminuir esta impedancia del sistema cuando se realizan los ajustes por medio del circuito equivalente afecta el elemento de la resistencia de transferencia de carga (Liu & Zhang, 2014)

Figura 21: Resistencia de la capa nativa en los tres sitios de exposición.



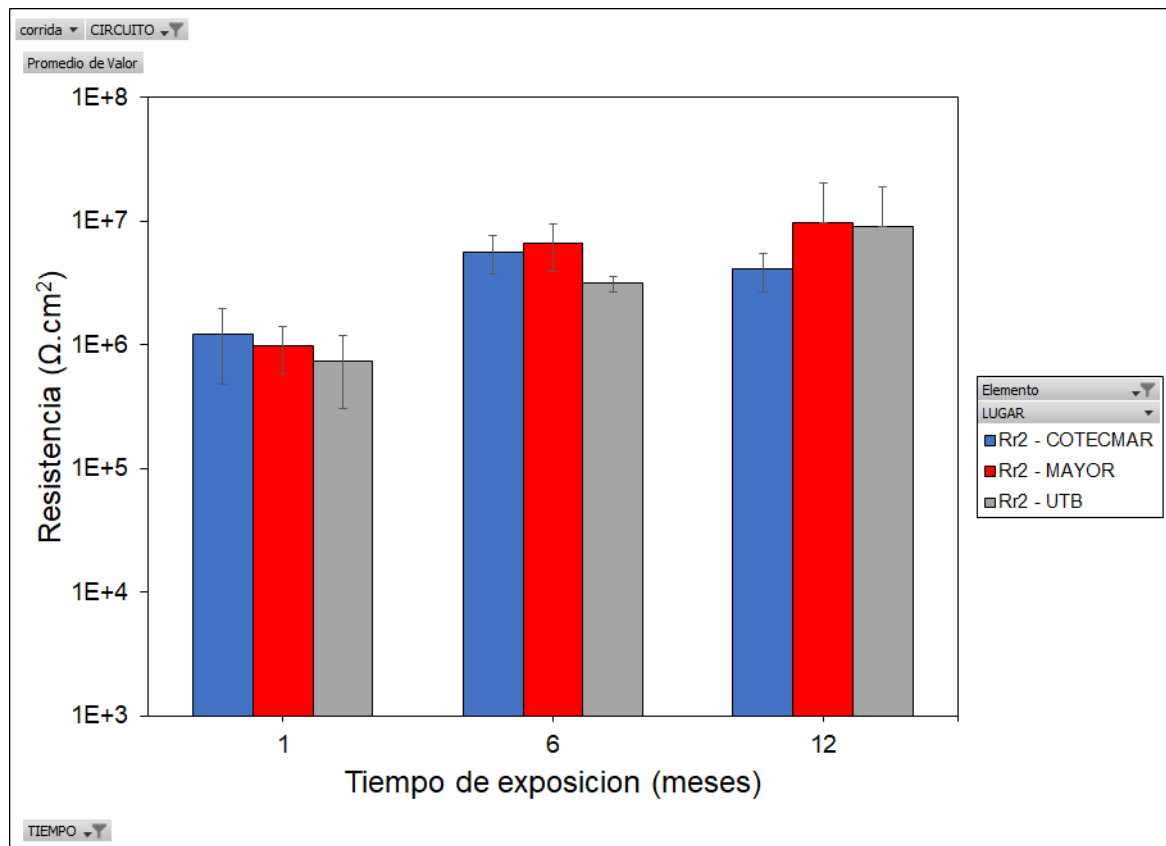
La resistencia R_{r1} (resistencia de la capa nativa) es un componente eléctrico del circuito equivalente que representa características de la capa de óxido nativo sobre la superficie de la aleación de aluminio 6061, lo cual se puede verificar en la **figura 21**, donde en el tiempo 0 meses (probeta no expuesta) la resistencia R_{r1} es igual para los diferentes lugares de exposición.

Luego de un mes de exposición es posible ver como la capacidad de resistencia para la capa nativa de la aleación de aluminio 6061 aumenta tanto para UTB como para Cotecmar,

esto es debido a que la concentración de cloruros para estos dos lugares es más baja (**Tabla 9**) lo cual evitó que se generará picado sobre las muestras expuestas en UTB y Cotecmar, posiblemente en este lapso de tiempo se dio lugar a que se generarán otros componentes de la capa nativa, tales como la boehmita ($Al(OOH)$) y bayerita ($Al(OH)_3$) (Yanjie, 2013), ya que como se sabe la alúmina (Al_2O_3) se empieza a formar al primer contacto con el ambiente (Alu-stock, 2020).

Por otra parte, luego de exponerse por un mes, el colegio mayor de Bolívar sí representa un disminución de las propiedades de resistencia de la capa nativa puesto que este se encuentra muy aledaño a la bahía lo cual hace que esté expuesto a mayores concentraciones de cloruro, si se sigue observando el comportamiento en función del tiempo es posible ver como la capa nativa para UTB y COTEMAR dejan de generar la capacidad de resistencia de óxido nativo del material lo cual sucede por el aumento del tiempo de exposición junto a sus contaminantes, más sin embargo, se puede constatar que el lugar que mayor afectaciones genera sobre la capa nativa de la aleación es el colegio mayor por sus cercanía al mar, donde los cloruros tienen una mayor concentración y a su vez no permiten que su capa nativa se genere ni siquiera en el primer mes de exposición, también es posible ver cómo es la probeta que tiene mayor afectaciones por corrosión de picado en la **figura 13** imagen obtenida por MEB.

Figura 22: Resistencia de producto de corrosión formado en los tres sitios de exposición.



A diferencia de la resistencia de R_{ct} y R_{r1} , R_{r2} (resistencia de los productos de corrosión formados) no se utiliza para ajustar los espectros de la aleación de aluminio 6061 sin exponer, debido a que en este momento el material no contiene productos de corrosión sobre su superficie.

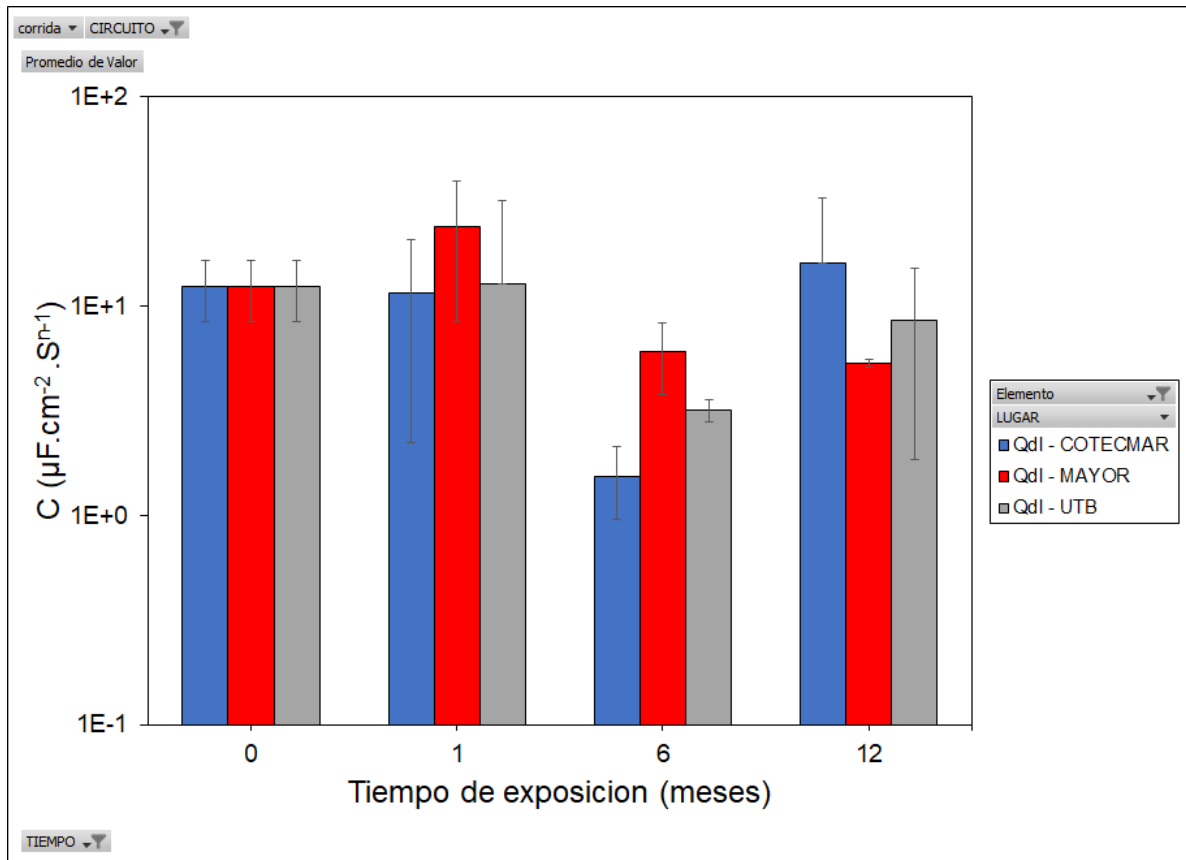
La resistencia de productos de corrosión formado estima las propiedades protectoras del producto de corrosión (Liu & Zhang, 2014), es útil a la hora de analizar el comportamiento frente a la corrosión de un metal expuesto, para la **figura 22** se puede observar que la resistencia del producto de corrosión formado aumenta tanto para UTB como para el Colegio mayor de Bolívar durante el año de exposición. Para Cotecmar disminuye de 6 a 12 meses de manera, esta disminución al no ser normal, se puede justificar debido a que para los 12 meses el módulo de bode (**Figura 17b**) deja ver que la impedancia del sistema es menor comparado con los otros dos lugares.

El aumento de la resistencia de producto de corrosión en UTB y colegio mayor de Bolívar es normal, debido a que estos productos de corrosión se deben a compuestos de azufre e hidroxocloruros que se concentran sobre la superficie del material (Yanjie, 2013), la resistencia aumenta y genera un efecto de barrera que disminuye el ataque sobre el material por medio de sus productos de corrosión sobre la superficie del mismo, lo que explica en gran parte que la velocidad de corrosión disminuye porque se genera una mayor pérdida de masa sobre las muestras al aumentar el tiempo de exposición. Para 12 meses, en la **figura 22** se puede observar que la resistencia de productos de corrosión es mayor para colegio mayor de Bolívar, lo que da a entender que el producto formado sobre la superficie es mayor, siendo congruente con la **figura 13** de MEB.

4.5.7. Comportamiento de los elementos de fase constante del circuito equivalente respecto al tiempo de exposición.

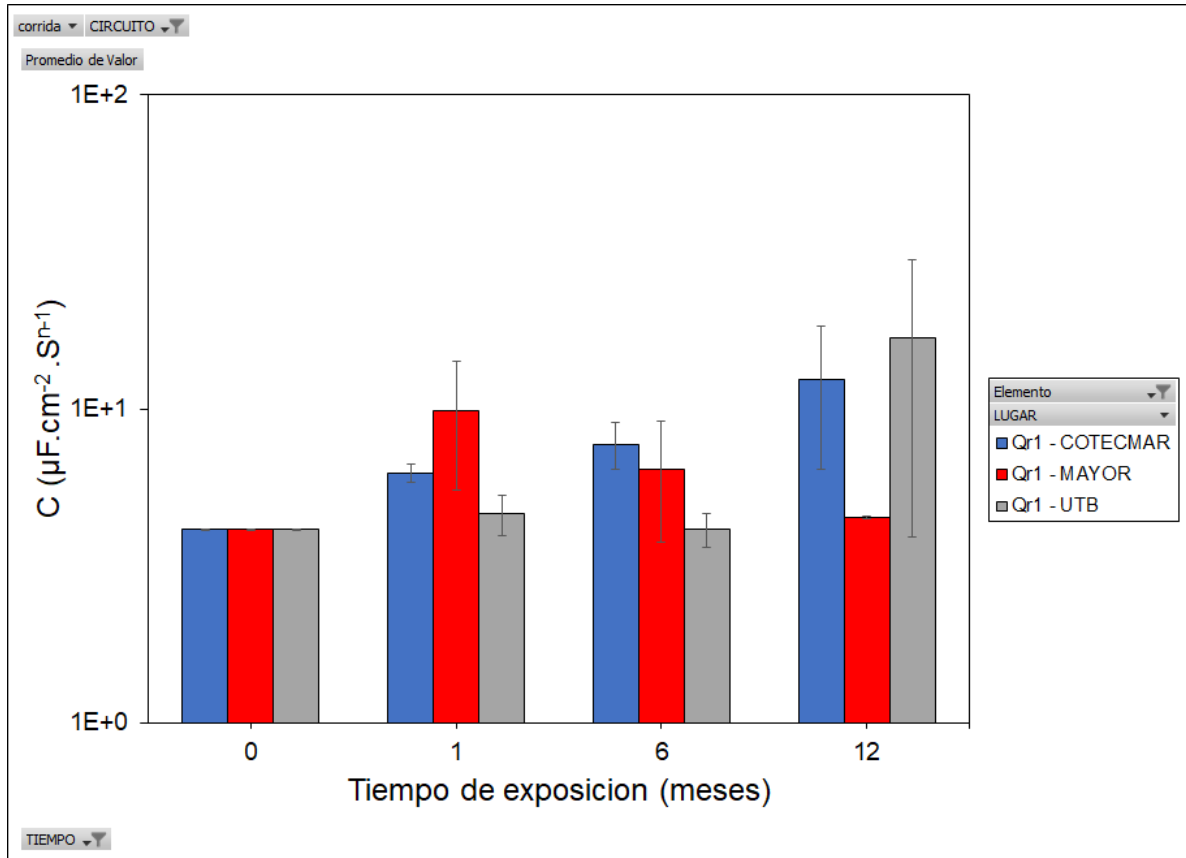
El comportamiento de los elementos de fase constante se muestran en la **figura 23**, **figura 24** y **figura 25**, donde es posible observar dicho comportamiento respecto al tiempo de exposición de las muestras en los tres lugares de estudio, estas gráficas son construidas con el valor promedio de tres muestras que se sometieron a las mismas condiciones iniciales tanto para UTB como para Cotecmar, en el caso de Colegio Mayor de Bolívar solo se promediaron dos muestras, debido a que la tercera contaba con una gran dispersión de datos y al realizar el análisis de Kronig-Kramers con es software Nova 1.11 demostraba que la calidad de los datos experimentales era deficiente y al realizar el ajuste de los espectros de impedancia electroquímica podría generar valores erróneos que intervinieran en el análisis del circuito equivalente. A diferencia de los elementos resistivos, los elementos de fase constante obtenidos mediante Nova 1.11 se dividen por el área de la medida de EIS, la cual tiene un diámetro de 2 cm (el área es aproximadamente $3,1416 \text{ cm}^2$) para finalmente reportarlos en las gráficas.

Figura 23: Elemento de fase constante de transferencia de carga para los tres sitios de exposición.



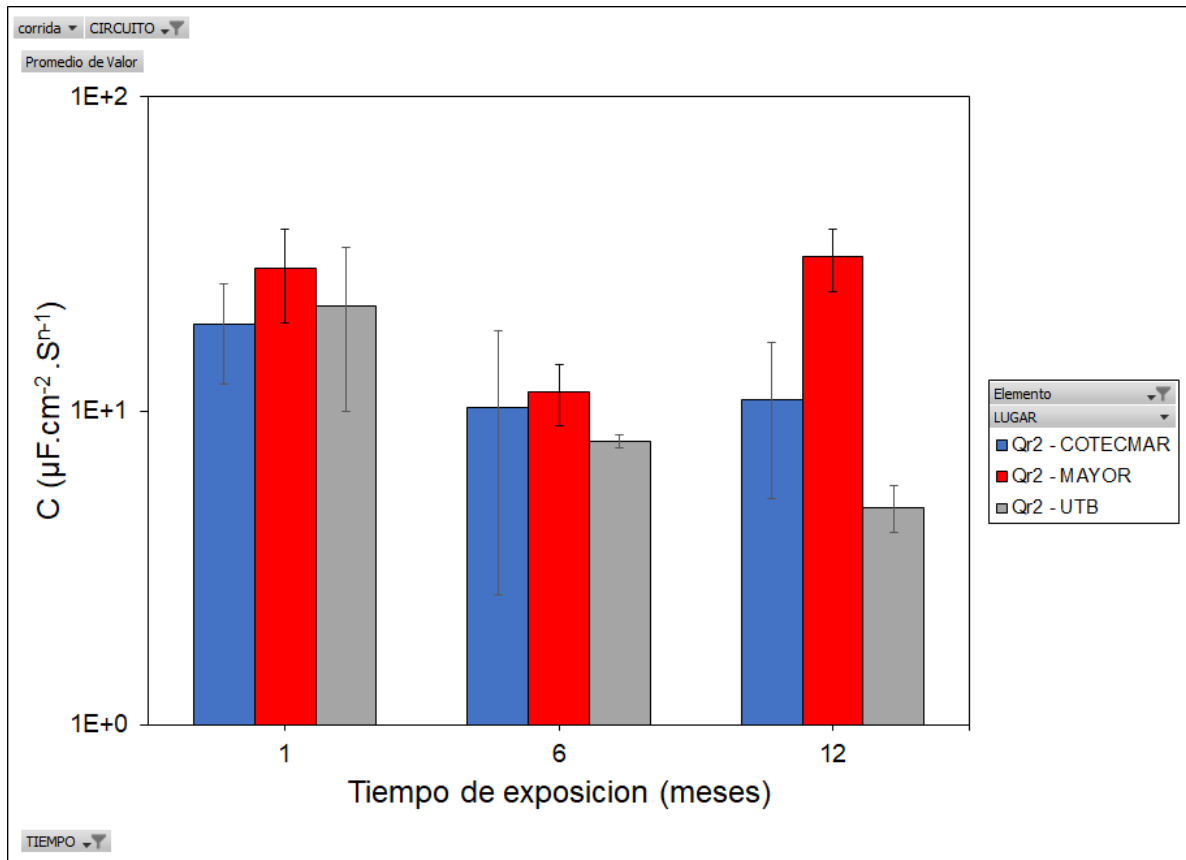
Qdl puede describir algunas características del proceso de transferencia de carga de la aleación, cómo es posible observar en el transcurso de 0 meses a 12 meses de exposición se puede ver como Qdl tiene un decaimiento de mayor magnitud para el colegio mayor de Bolívar, esto puede suceder por una razón y es el aumento del área de la doble capa lo cual sucede por el aumento de la densidad de los hoyos generados por iones agresivos de los contaminantes de la zona, lo cual conlleva a aumentar al área del proceso de transferencia de carga, si se relaciona con las imágenes obtenidas de SEM es posible ver como el picado aumenta considerablemente y siendo más agresivo en el colegio mayor seguido de COTECMAR por último pero no despreciable UTB, lo cual sustenta que al aumentar la agresividad de los hoyos Qdl tiene un decrecimiento que es posible observar luego de 12 meses de exposición y se puede visualizar en la **figura 23**.

Figura 24: Elemento de fase constante de la capa nativa para los tres sitios de exposición.



Qr1 es aproximado a un condensador, el cual se encarga de proveer características de la protección ejecutada por la capa nativa de aleación en estudio, en este caso aleación de aluminio 6061. Gracias a SEM es posible ver como la capa nativa está corroída por picadura lo cual le permite a los iones corrosivos alcanzar el sustrato. Observado en la **figura 24**, donde al ver 0 meses de exposición comparado con la información que presenta luego de 12 meses de exposición, es posible interpretar como la capa de óxido nativo está siendo afectada por picadura, lo último mencionado también se puede ver en las figuras (**figura 12.a**, **figura 13.c**, **figura 14.b**) donde se muestra a la misma amplitud la magnitud del picado ocasionado sobre la aleación de aluminio 6061.

Figura 25: Elemento de fase constante de la capa de producto de corrosión formado, para los tres sitios de exposición.



El valor de Qr2 es aproximado a una capacitancia y representa las características de la capa del producto de corrosión formado, si se observa la **figura 25** se puede ver con claridad que disminuye para UTB durante sus 12 meses de exposición (de 1 a 12 meses, recordando que para 0 meses no se incluye debido a que todavía no se presentan productos de corrosión formados), lo cual tiene lógica desde el punto de vista que para estos dos lugares aumenta la capa del producto de corrosión formado sobre la superficie, recordando que esta capa está compuesta en parte por hidroxocloruros y sulfatos (Yanjie, 2013), los aumentos de Qr2 para Cotecmar y Colegio Mayor de Bolívar de 6 a 12 meses se pueden deber a que independientemente de que se generen mayores productos de corrosión como se observa en las **figuras 13 y 14** estos cuentan con características distintas, como la densidad o que tan compacta se presente.

5. Conclusiones

-Los datos meteorológicos (Temperatura, humedad relativa y precipitación) reportados por parte de la institución del Ideam y el Dimar dejan ver que el año en que fueron expuestas las muestras (2016) fue agresivo en cuanto se refiere a temperatura y humedad relativa, cumpliendo con la recomendación de la norma ISO 9223 del 2012 (la norma recomienda exponer las muestras en un periodo de tiempo agresivo). En cuanto a contaminantes, se tiene la certeza que los valores cuantitativos de la deposición de cloruros son los más acertados para realizar análisis sobre las muestras, ya que estos datos fueron obtenidos directamente de los lugares y fechas de exposición de las muestras del proyecto, dando buenos resultados, ya que este tipo de contaminante genera picado sobre las muestras destruyendo las películas de óxido nativo luego de un año de exposición, como lo muestran las imágenes obtenidas de SEM (**figuras 12, 13 y 14**), no obstante, los contaminantes de dióxido de azufre (SO₂) y dióxido de nitrógeno (NO₂) reportados por la valoración de niveles de riesgos ambientales en el distrito de cartagena para el año 2010 (ResearchGate, 2010) sirvieron como base para ayudar a describir el comportamiento similar que tenía el lugar de UTB con el de Cotecmar frente a el ataque de corrosión sobre las muestras, ya que como lo muestra la **figura 9**, la concentración de estos contaminantes se presenta de forma semejante para estos dos sitios.

-Las estimaciones de las velocidades de corrosión utilizando las funciones dosis-respuesta presentadas por Kucera y por la norma ISO 9223 del 2012, dan a conocer que el sitio que presenta mayor ataque por corrosión es el colegio mayor de Bolívar, seguido de Cotecmar y UTB, concordando con que al trabajar con estas ecuaciones se comprueba que una de las variables de mayor peso para definir la velocidad de corrosión es la concentración de cloruros, incluso esta influye en mayor proporción que los dióxidos de azufre, lo que tiene lógica debido a que los cloruros generan picado sobre la muestra, afectando directamente la pérdida de masa sobre la misma.

-La velocidad de corrosión por decapado químico es más precisa y exacta respecto a la estimación de velocidad por función dosis-respuesta, ya que esta se basa directamente sobre la pérdida de masa de la muestra en los intervalos de tiempo de exposición analizados, en esta **figura 11** se puede observar como la velocidad de corrosión disminuye al aumentar el tiempo sin importar que la pérdida de masa aumente **figura 10**, esto cobra sentido cuando se ve la **ecuación 5** y se concluye que independientemente de que la pérdida de masa aumente con el tiempo, aumenta en mayor proporción el tiempo de exposición (lo que conlleva a la disminución de la velocidad), no obstante, se ve que las funciones dosis respuesta cumplen con el objetivo de prever el sitio de mayor ataque, ya que como también se ve en la **figura 11** sigue siendo el de colegio mayor de Bolívar. El comportamiento similar de la velocidad de corrosión de UTB y cotecmar (Figura 13) se

puede deber a que la concentración de dióxidos de azufre para estos dos lugares es semejante.

- Los análisis realizados con base en las imágenes obtenidas por microscopía electrónica de barrido (MEB) en las **figuras 12, 13 y 14** permiten hacer un análisis de tipo cualitativo sobre lo que se visualiza sobre la superficie de la muestra, se observa que el producto de corrosión formado sobre la superficie del metal y la corrosión por picadura se puede asociar con la deposición de cloruros presentes en los lugares de exposición de las muestras, ya que Colegio Mayor de Bolívar cuenta con mayor producto de corrosión y un área de picado superior en comparación con los otros dos sitios de exposición, siendo congruente con los valores presentados para este lugar en la **tabla 9**.

- Los espectros de impedancia electroquímica de las **figuras 16, 17 y 18** muestran un comportamiento similar, en el cual para la fase de bode de la aleación de aluminio se prevé que el comportamiento del circuito será de tipo capacitivo debido a que el ángulo de la corriente respecto al voltaje tiende a acercarse a los -90° , además se observa tanto en el módulo de bode a bajas frecuencias y en Nyquist que la impedancia total del sistema aumenta hasta los 6 meses y luego decae, lo que se podría interpretar con que las capacidades resistivas de las capas formadas sobre el metal aumentan a 6 meses y después decrecen a 12 meses por el fuerte picado sobre las muestras.

- La película de óxido nativo luego de un año de exposición tiene un gran desgaste provocado por los contaminantes de la zona lo cual es posible verlo en la **figura 26**, donde se constata que el colegio mayor va ser el lugar que presenta mayor afectaciones sobre la aleación gracias a su cercanía al mar donde los dióxidos tiene una mayor concentración, por otra parte es posible observar cómo a diferencia de UTB y COTEMAR la aleación que se expuso en el colegio no tuvo la capacidad de tener una regeneración por posible generación de bohemita ($AlOOH$) y bayerita ($Al(OH)_3$).

- Según los datos obtenidos por medio de los parámetros de circuito equivalente, se puede observar que finalmente se obtuvieron capas de producto de corrosión formado sobre la capa nativa de las muestras expuestas en los diferentes sitios, mejorando las propiedades protectoras como lo demuestran las tendencias de Rr_2 (Las muestras de Colegio Mayor de Bolívar presentan las mejores propiedades protectoras, observando la figura 21), estos estaban compuestos en mayor parte por hidroxiclорuros y sulfatos, en cuanto a los valores de Rr_1 se puede ver que para 1 mes de exposición aumentan las propiedades protectoras de la capa nativa para el lugar de UTB y Cotecmar, en cambio, para el lugar de Colegio Mayor de Bolívar no se da tiempo a que las propiedades de protección a que aumenten estas propiedades de protección, ya que debido la gran concentración de cloruros actúa y destruye la capa nativa a tan solo un mes de exposición, igualmente, las propiedades de protección de la capa nativa descienden de 1 mes a 12 meses para todas las muestras expuestas en los tres lugares, debido a que la misma concentración de cloruros termina generando picado sobre esta capa. En cuanto a la tendencia de la resistencia de transferencia de carga se logra ver que aumenta a seis meses de exposición, lo cual se puede deber a efectos de inhibición de la capa nativa o de los mismos productos de corrosión formados sobre la misma, pero luego, de 6 a 12 meses se logra ver que este parámetro disminuye para todas las muestras expuestas en los diferentes sitios, y esto se explica debido a que aumentan los iones agresivos.

6. Referencias

[1] Aguirre, L. (Mayo 3, 2006). ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL Y DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE UNIONES DISÍMILES DE ALEACIONES DE ALUMINIO 6061 Y 7075 MEDIANTE SOLDADURA FUERTE. repositorio institucional comimsa. <https://comimsa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1022/149/1/Monograf%C3%ADa%20Luis%20A.%20Aguirre%20Hern%C3%A1ndez.pdf>

[2] Alu-stock. (2020). EL ALUMINIO. <https://www.alu-stock.es/multimedia/descargas/13/Cap10-el-aluminio.pdf>

[3] AMCHAM COLOMBIA. (Julio 16, 2019). Grupo puerto de cartagena innovando con tecnología en sus procesos. <https://amchamcartagena.org/ultimas-noticias/grupo-puerto-de-cartagena-innovando-con-tecnologia-en-sus-procesos/>

[4] Bril, X. (2001). corrosión del aluminio. corrosion. <http://www.corrosion.aluminum.impedance.spectroscopy.toile-libre.org/Chapitre1.html#:~:text=1.1.8%20Corrosi%C3%B3n%20del%20aluminio%206061&text=Tal%20metal%20forma%20una%20pel%C3%ADcula,la%20mayor%3%ADa%20de%20los%20medios.&text=Como%20la%20corrosi%C3%B3n%20del%20aluminio,a%20resistir%20a%20los%20ataques>

[5] Caballero, C., Valencia, F & Catacoli, A. (2018). ESTUDIO DEL MATERIAL PARTICULADO DE TAMAÑO MENOR A 10 MICRAS (PM10) EN EL AIRE AMBIENTE DE LA ZONA ALEDAÑA A LA UNIVERSIDAD LIBRE – SEDE CANDELARIA. Repositorio Universidad Libre. <https://repository.unilivre.edu.co/bitstream/handle/10901/15882/DF%20-%20Estudio%20del%20PM10%20en%20la%20U%20Libre%20Sede%20Candelaria%20-%20Caterine%20Caballero%20y%20Daniel%20Valencia.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

[6] Cartagena comovamos. (2020). Informe de calidad de vida. <https://www.cartagenacomovamos.org/nuevo/ecv/>

[7] Cartagena competitiva y compatible con el clima. (2018). Puertos e industria compatibles con el clima. plan 4c. <https://plan4c.cartagena.gov.co/plan-4c/estrategia-5-puertos-e-industria-compatibles-con-el-clima/>

- [8] CeMCAQ. (2020). Dioxido de nitrogeno. Centro de monitoreo de la calidad del aire del estado de Querétaro. <http://www.cemcaq.mx/contaminacion/bioxido-de-nitrogeno-no2>
- [9] Cui, Z., Li, X., Zhang, H., Xiao, K., Dong, C., Liu, Z y Wang, L. (Junio 28, 2015). Atmospheric Corrosion Behavior of 2A12 Aluminum Alloy in a Tropical Marine Environment. *Advances in Materials Science and Engineering*. <https://www.hindawi.com/journals/amse/2015/163205/>
- [10] Davis, R. (1993). *Aluminum and Aluminum Alloys*. ASM International. https://books.google.es/books/about/Aluminum_and_Aluminum_Alloys.html?id=Lskj5k3PSlC&hl=es#:~:text=Joseph%20R.,6%20Reviews
- [11] Dirección General Marítima. (Enero, 2013). Repositorio digital, marítimo, fluvial y costero. Ministerio de defensa nacional. <https://cecoldigital.dimar.mil.co/view/divisions/BMCC/>
- [12] Epa Cartagena. (2017). Informe del estado de los recursos naturales y del ambiente urbano de Cartagena. <http://observatorio.epacartagena.gov.co/wp-content/uploads/2018/02/INFORME-AVANCE-ESTADO-DE-LOS-RECURSOS-NATURALES-2017-8.pdf>
- [13] Gabrian. (2016). Aluminio 6061:conozca sus propiedades y usos. <https://www.gabrian.com/es/aluminio-6061-conozca-sus-propiedades-y-usos/>
- [14] Galan, C. (2003). slideshare. Estudio de la fatiga termica segun API 571 RP. <https://es.slideshare.net/DubraskaCedeo/fatiga-termica-para-la-exposicion>
- [15] García, F., Palacio, C & García, U. (Febrero, 2012). DISTRIBUCIÓN VERTICAL DE TEMPERATURA Y SALINIDAD EN EL ÁREA COSTERA DE SANTA MARTA (COLOMBIA). scielo. <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v79n171/a29v79n171.pdf>
- [16] Garmy Instruments. (2020). Basic of electrochemical impedance spectroscopy. Garmy. <https://www.gamry.com/application-notes/EIS/basics-of-electrochemical-impedance-spectroscopy/>
- [17] Gasparini. (s.f.). Aluminio y sus aleaciones. recuperado septiembre 5, 2020, de <https://www.gasparini.com/es/blog/aluminio-y-sus-aleaciones/>
- [18] Guang, X., Lin, P., Man, C., Cui J., Wang, H., Dong, Chao-fang, D & Li, X. (Octubre 30, 2018). Prediction model for atmospheric corrosion of 7005-T4 aluminum alloy in industrial and marine environments. Springerlink, 1313-1319. <https://ezproxy.uan.edu.co:2077/article/10.1007/s12613-018-1684-6>
- [19] Hai, L., Daozhao, P., Zhixiu, W. y Ziqiao, Z. (2009). INFLUENCE OF T616 TEMPER ON TENSILE AND INTERGRANULAR CORROSION PROPERTIES OF 6061 ALUMINUM ALLOY. *Acta Metallurgia Sinica*. <https://www.ams.org.cn/EN/10.3724/SP.J.1037.2009.00570>

[20] Ideam. (Enero, 2013). Consulta y descarga de datos Hidrometeorológicos. <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>

[21] Ideam. (julio, 2020). CARACTERÍSTICAS CLIMATOLÓGICAS DE CIUDADES PRINCIPALES Y MUNICIPIOS TURÍSTICOS. Ideam. <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418894/Caracter%C3%ADsticas+de+Ciudades+Principales+y+Municipios+Tur%C3%ADsticos.pdf/c3ca90c8-1072-434a-a235-91baee8c73fc#:~:text=La%20humedad%20relativa%20del%20aire%20oscila%20durante%20el%20a%C3%B1o%20entre,menor%20en%20julio%20y%20agosto.>

[22] Ideam. (2020). Problema de la lluvia ácida. <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/el-problema-de-la-lluvia-acida>

[23] JIMENEZ, Alfonso. (Junio, 2016). Estudio de la generación de recubrimientos protectores en ambiente marino sobre aleaciones de aluminio Al6061 T6 y Al7075 T6 mediante líquidos iónicos. Repositorio UPTC. <https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/5702/tfe-jim-est.pdf?sequence=1>

[24] Kharitonov, S., Dobryden, I., Sefer, B., Ryl, J., Wrzesińska, A., Makarova, I., Bobowska, I., Kurilo, I & Claesson, P. (Mayo, 2020). Surface and corrosion properties of AA6063-T5 aluminum alloy in molybdate-containing sodium chloride solutions. Corrosion Science. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010938X19326708>

[25] Kucera, V. (2020). Dose-response Functions as a Basis for Assessment of Acceptable Levels. ITAM ARCCHIP. http://www.itam.cas.cz/ARCCHIP/w06/w06_kucera.pdf

[26] Liu, Y., Zhang, W. (Diciembre, 2014). Atmospheric corrosion behaviour of pure Al 1060 in tropical marine environment. Taylor & Francis, 438-448. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1179/1743278214Y.0000000241?scroll=top&needAccess=true>

[27] Madecentro. (2001). ficha técnica Aluminio. Madecentro. <https://www.madecentro.com/media/ficha-tecnica/aluminio.pdf>

[28] Mendoza, J., Duran, R. y Genesca, J. (s.f.) Espectroscopia de impedancia electroquímica en corrosión. depa. <http://depa.fquim.unam.mx/labcorr/libro/Manual-EIS-IMP-UNAM.PDF>

[29] Metrohm Autolab B.V. (s.f.). Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) Part 1 – Basic Principles. https://www.ecochemie.nl/download/Applicationnotes/Autolab_Application_Note_EIS01.pdf

[30] Metrohm Autolab B.V. (s.f.). Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) Part 2 – Experimental Setup. https://www.ecochemie.nl/download/Applicationnotes/Autolab_Application_Note_EIS02.pdf

- [31] Metrohm Autolab B.V. (s.f.). Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) Part 3 – Data Analysis. https://www.ecochemie.nl/download/Applicationnotes/Autolab_Application_Note_EIS03.pdf
- [32] Metrohm Autolab B.V. (s.f.). Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) Part 4 – Equivalent Circuit Models. <https://mmrc.caltech.edu/AutoLab/Manuals/EIS%20part%204.pdf>
- [33] Minambiente. (2020). Resolución 610 del 2010. <https://www.minambiente.gov.co/>
- [34] Para una Cartagena sostenible y competitiva. (Enero, 2016). plan de desarrollo. Cartagena. https://www.cartagena.gov.co/Documentos/2016/Transparencia_y_aip/Plan_de_Desarrollo/2016/ACUERDO-006-2016-PLAN-DE-DESARROLLO.pdf
- [35] Piratoba, U., Vera, E. y Ortiz, C. (2010). Aspectos basicos en la interpretacion de diagramas de impedancia electroquimica. Universidad nacional de colombia. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/15671/36054>
- [36] ResearchGate. (2010). Valoración de los niveles de riesgos ambientales en el distrito de Cartagena. https://www.researchgate.net/profile/Ciro_Bustillo-Lecompte/publication/284284893_Valoracion_de_los_niveles_de_riesgos_ambientales_en_el_Distrito_de_Cartagena_de_Indias/links/578e98bb08ae35e97c3f74c0/Valoracion-de-los-niveles-de-riesgos-ambientales-en-el-Distrito-de-Cartagena-de-Indias.pdf
- [37] Scai. (2020). Microscopía Electrónica de Barrido. scai-uma. <http://www.scai.uma.es/areas/micr/sem/sem.html>
- [38] Shetty, S., Shetty, A. (Septiembre 16, 2015). Studies on Corrosion Behavior of 6061 Al-15 vol. pct. SiC(p) Composite in HCl Medium by Electrochemical Techniques. Springerlink, 374-381. <https://ezproxy.uan.edu.co:2077/article/10.3103%2FS1068375515040134>
- [39] Tdx tesis Doctorals en xarxa. (s.f.). Estudio del comportamiento frente a la corrosión. recuperado septiembre 6, 2020, de <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6045/25Mtbp25de29.pdf?sequ>
- [40] Toshev, Y., Kstadinov, K. (2006). Protective coating of zinc and zinc alloys for industrial applications. Sciencedirect. [https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/polarization-resistance#:~:text=lower%20corrosion%20current\).-](https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/polarization-resistance#:~:text=lower%20corrosion%20current).-), Polarization%20resistance%20is%20defined%20as%20the%20resistance%20of%20the%20specimen,can%20be%20calculated%20from%20it.
- [41] Universidad de los Andes. (s.f.). Microscopia de barrido de electrones. <https://investigaciones.uniandes.edu.co/microscopio-electronico-de-barrido-meb/>

- [42] Universidad de los Andes. (s.f.). Microscopio electrónico de barrido JEOL JSM 6490LV. <https://investigaciones.uniandes.edu.co/microscopio-electronico-de-barrido-jeol-jsm-6490lv/>
- [43] Universidad tecnológica de bolívar. (Noviembre 30, 2018). El puerto de cartagena y su importancia para el desarrollo económico de la ciudad. utb. <https://www.utb.edu.co/noticias/el-puerto-de-cartagena-y-su-importancia-para-el-desarrollo-econ%C3%B3mico-de-la-ciudad>
- [44] Vaquero Morata, S. (2015). Programa de Doctorado de Energías y Combustibles para el Futuro. Universidad Autónoma de Madrid. Universidad autónoma de Madrid. https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/666387/vaquero_morata_susana.pdf?sequence=1
- [45] Vera, R., Schrebler, R., Layana, G., Orellana, F y Olgúin, A. (Junio 30, 1998). Corrosión por picaduras del aluminio y de la aleación Al-6201 en soluciones de NaCl. Revista de metalurgia, vol 34 Num 3. <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/view/793>
- [46] Yanjie, L., Zhenyao, W. (Noviembre, 2013). Study on influence of native oxide and corrosion products on atmospheric corrosion of pure Al. Corrosion Science, 169-176. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0010938X1300509X>

