



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA EN METALURGIA

**ESTUDIO DE EXTRACTO DE GEOFFROEA DECORTICANS COMO
INHIBIDOR DE LA CORROSIÓN PARA ACERO AL CARBONO AISI 1020 EN
SOLUCIÓN 1 M NaCl**

Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el
título de Ingeniería Civil en Metalurgia

Profesor Guía: Dr. Alvaro Soliz Ayala

Makarena Constanza Tapia Álvarez

Copiapó, Chile 2023



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA EN METALURGIA

**ESTUDIO DE EXTRACTO DE GEOFFROEA DECORTICANS COMO
INHIBIDOR DE LA CORROSIÓN PARA ACERO AL CARBONO AISI 1020 EN
SOLUCIÓN 1 M NaCl**

Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el
título de Ingeniería Civil en Metalurgia

Profesor Guía: Dr. Alvaro Soliz Ayala
Comisión: Dr. Juan Muená Barría
Dr. Alexis Guzmán Méndez

Makarena Constanza Tapia Álvarez

Copiapó, Chile 2023

**ESTUDIO DE EXTRACTO DE GEOFFROEA DECORTICANS COMO
INHIBIDOR DE LA CORROSIÓN PARA ACERO AL CARBONO AISI 1020 EN
SOLUCIÓN 1 M NaCl**

Este documento de Trabajo de Titulación fue aprobado por:

Nombre de la comisión	Calificación	Firma
Dr. Alvaro Soliz Ayala Departamento de Ingeniería en Metalurgia Universidad de Atacama Copiapó-Chile	6.8	
Dr. Alexis Guzmán Méndez Departamento de Ingeniería en Metalurgia Universidad de Atacama Copiapó-Chile	6.7	
Dr. Juan Mueva Barría Departamento de Química y Biología Universidad de Atacama Copiapó-Chile	6.8	

Mg. Juan Chamorro González
Director Departamento de Ingeniería en Metalurgia

DEDICATORIA

Para mis padres. Gracias por la dedicación, la confianza, la ternura y el amor que me entregaron en cada paso importante de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a mi madre, Margarita Álvarez Sierra, mujer que ha dedicado su vida a su familia, por cada caminata llena de risas, ánimo y consejos que me entregaste para conseguir este logro.

Gracias a mi padre, Néstor Tapia Tapia, hombre de trabajo y esfuerzo que sin su apoyo no podría estar escribiendo estas palabras. Mil gracias padre por siempre tomar mi mano.

Gracias a mis hermanas, Romina Tapia Álvarez y Daniela Tapia Álvarez, mis mujeres favoritas, llenas de matices y colores. Sin ustedes no estaría cumpliendo este sueño.

Gracias a mis sobrinos, Matías Cortes Tapia y Sophia Valdés Tapia, por enseñarme a amar incondicionalmente y mantener mi niñez viva.

Gracias a mi pareja, Paul Stumptner Olivares, por siempre inspirarme y recordarme de lo que soy capaz. Gracias por acompañarme en este camino, llenándolo de respeto, amor y sabiduría. Te amo.

Gracias a mi profesor guía, Dr. Álvaro Soliz Avala, por ser una excelente persona y académico, sin su apoyo no habría podido disfrutar este proceso.

Se agradece el apoyo financiero para la adquisición de insumos del proyecto DIUDA-22430 llevado por el Dr. Álvaro Soliz Ayala del Departamento de Ingeniería en Metalurgia.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I. MARCO INTRODUCTORIO	1
1.1 Aspectos generales	1
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Objetivo general	3
1.2.2 Objetivos específicos.....	3
1.3 Hipótesis.....	4
1.4 Planteamiento del problema	4
1.5 Justificación.....	4
1.6 Delimitaciones.....	5
CAPÍTULO II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1 Corrosión y sus principios químicos	6
2.2 Microscopia electrónica de barrido (MEB).....	7
2.3 Técnicas electroanalíticas.....	8
2.3.1 Voltaje de circuito abierto (OCV)	8
2.3.2 Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS).....	9
2.4 Método circuito equivalente para análisis del EIS	11
2.5 Inhibidores de corrosión.....	12
2.6 Geoffroea decorticans	14
2.7 Estado del arte	15
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA	17
3.1 Materiales y Equipos	17
3.1.1 Materiales	17
3.1.2 Equipos	17
3.2 Preparación del extracto acuoso	18

3.3 Preparación de la solución salina	19
3.4 Análisis electroquímico	19
3.5 Análisis morfológico	21
3.6 Determinación eficiencia del inhibidor	21
3.7 Determinación tasa de corrosión a través de EIS	21
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	23
4.1 Resultados de las mediciones electroanalíticas a través de OCV	23
4.2 Resultados de las mediciones electroanalíticas a través de Impedancia (EIS).....	24
4.2.1 Diagrama de Nyquist.....	25
4.2.2 Diagrama de Bode ($\log Z $ vs $\log(\text{freq})$)	27
4.2.3 Diagrama de Bode ($\text{Phase}(Z)$ vs $\log(\text{freq})$)	28
4.3 Análisis de circuito equivalente y comparación de los cálculos de resistencias para ambos inhibidores	29
4.4 Análisis tasas de corrosión	32
4.5 Análisis morfológico	34
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES	41
Sugerencias para futuros trabajos.....	43
REFERENCIAS	44
ANEXOS	49
Anexo A. Tablas mediciones de la técnica OCV	49
Anexo B. Tablas mediciones de la técnica PEIS	50
Anexo C. Tablas resistencias circuitos equivalentes	51
Anexo D. Resultados EDS	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Diagramas Nyquist y Bode aplicados a un acero dulce en una solución de 0,5 M de H_2SO_4 mediante extracto de hoja de rábano.....	11
Figura 2.2 Clasificación de los inhibidores de corrosión de acuerdo con su origen....	13
Figura 2.2 Hojas del <i>Geoffroea Decorticans</i>	15
Figura 3.1 Extracción acuosa en extractor Soxhlet.....	18
Figura 3.2 Celda electroquímica.....	20
Figura 3.3 Electrodo de referencia de Ag/AgCl (a) y electrodo auxiliar o contraelectrodo de platino (b).	20
Figura 3.4 Electrodo de trabajo de acero al carbono tipo AISI 1020.....	20
Figura 4.1 Curvas OCV para el acero AISI 1020 en soluciones de 1 M de NaCl con diferentes inhibidores de Chañar y volúmenes. Inhibidor con metanol (a) e inhibidor con acetato de etilo (b).....	24
Figura 4.2 Diagrama Nyquist para el acero AISI 1020 en soluciones de 1 M de NaCl con diferentes inhibidores de Chañar y volúmenes. Inhibidor con metanol (a) e inhibidor con acetato de etilo (b).....	26
Figura 4.3 Resistencia a la solución presentada para cada inhibidor de Chañar a diferentes volúmenes.	27
Figura 4.4 Diagrama de Bode (impedancia- frecuencia) para el acero AISI 1020 en soluciones de 1 M de NaCl con diferentes inhibidores de Chañar y volúmenes. Inhibidor con metanol (a) e inhibidor con acetato de etilo (b).....	28
Figura 4.5 Diagrama de Bode (ángulo de fase-frecuencia) para el acero AISI 1020 en soluciones de 1 M de NaCl con diferentes inhibidores de Chañar y volúmenes. Inhibidor con metanol (a) e inhibidor con acetato de etilo (b).....	29
Figura 4.6 Representación del circuito equivalente para el acero AISI 1020 en presencia de inhibidores de Chañar.....	30
Figura 4.7 Resistencia totales vs volumen de ambos inhibidores de Chañar para el acero AISI 1020 en soluciones 1 M de NaCl.....	31
Figura 4.8 Eficiencia de inhibición de las resistencias totales vs volumen de ambos inhibidores de Chañar para el acero AISI 1020 en soluciones 1 M de NaCl.	32

Figura 4.9 Imágenes MEB con una magnitud de 100x de la pieza de acero AISI 1020 inmersa en solución de 1 M de NaCl sin la presencia de inhibidor de Chañar. Imagen BSD (a) e imagen SE (b).	35
Figura 4.10 Imágenes MEB con una magnitud de 500x de la pieza de acero AISI 1020 inmersa en solución de 1 M de NaCl sin la presencia de inhibidor de Chañar. Imagen BSD (a) e imagen SE (b).	35
Figura 4.11 Imágenes EDS con una magnitud de 500x de la pieza de acero AISI 1020 inmersa en solución de 1 M de NaCl, sin la presencia de inhibidor de Chañar.	35
Figura 4.12 Imágenes MEB con una magnitud de 100x de la pieza de acero AISI 1020 inmersa en solución de 1 M de NaCl con 100 µL de inhibidor de Chañar con metanol. Imagen BSD (a) e imagen SE (b).	37
Figura 4.13 Imágenes MEB con una magnitud de 500x de la pieza de acero AISI 1020 inmersa en solución de 1 M de NaCl con 100 µL de inhibidor de Chañar con metanol. Imagen BSD (a) e imagen SE (b).	37
Figura 4.14 Imágenes EDS con una magnitud de 500x de la pieza de acero AISI 1020 inmersa en solución de 1 M de NaCl con 100 µL de inhibidor de Chañar con metanol.	37
Figura 4.15 Imágenes MEB con una magnitud de 100x de la pieza de acero AISI 1020 inmersa en solución de 1 M de NaCl con 100 µL de inhibidor de Chañar con acetato de etilo. Imagen BSD (a) e imagen SE (b).	39
Figura 4.16 Imágenes MEB con una magnitud de 500x de la pieza de acero AISI 1020 inmersa en solución de 1 M de NaCl con 100 µL de inhibidor de Chañar con acetato de etilo. Imagen BSD (a) e imagen SE (b).	39
Figura 4.17 Imágenes EDS con una magnitud de 500x de la pieza de acero AISI 1020 inmersa en solución de 1 M de NaCl con 100 µL de inhibidor de Chañar con acetato de etilo.	40
Figura D.1 Espectro químico del análisis EDS para el acero al carbono AISI 1020 inmerso en 1 M de NaCl sin inhibidor de Chañar.	52
Figura D.2 Espectro químico del análisis EDS para el acero al carbono AISI 1020 inmerso en 1 M de NaCl con inhibidor de Chañar con metanol.	52
Figura D.3 Espectro químico del análisis EDS para el acero al carbono AISI 1020 inmerso en 1 M de NaCl con inhibidor de Chañar con acetato de etilo.	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1 Resultados de intensidad de corriente y tasa de corrosión para acero AISI 1020 en soluciones 1 M de NaCl con y sin presencia de inhibidor de Chañar con metanol. ...	33
Tabla 4.2 Resultados de intensidad de corriente y tasa de corrosión para acero AISI 1020 en soluciones 1 M de NaCl con y sin presencia de inhibidor de Chañar con acetato de etilo.....	33
Tabla A.1 Resultados del potencial medidos del tiempo inicial y del tiempo final de la técnica OCV del inhibidor con metanol para los distintos volúmenes de 0, 5, 10, 25, 50, 100 y 200 μL	49
Tabla A.2 Resultados del potencial medidos del tiempo inicial y del tiempo final de la técnica OCV, del inhibidor con acetato de etilo para los distintos volúmenes de 0, 5, 10, 25, 50, 100 y 200 μL	49
Tabla B.1 Resultados de la R_s desde el diagrama de Nyquist para ambos inhibidores a los distintos volúmenes de 0, 5, 10, 25, 50, 100 y 200 μL , cuando $-\text{Im}(Z)=0 \text{ Ohm}$	50
Tabla C.1 Resultados cálculos resistencia inhibidor con metanol a volúmenes de 0, 5, 10, 25, 50, 100 y 200 μL	51
Tabla C.2 Resultados cálculos resistencia inhibidor con acetato de etilo a volúmenes de 0, 5, 10, 25, 50, 100 y 200 μL	51

RESUMEN

El presente estudio tiene la finalidad de establecer la capacidad que tiene la hoja de Chañar de la comuna de Copiapó, Chile, como inhibidor de corrosión para un acero al carbono AISI 1020 expuesto en una solución salina de 1 M de NaCl.

El estudio de evaluar la eficiencia del inhibidor de corrosión sobre el acero en un medio de elevada salinidad se realizó en base a extractos acuosos de Chañar a partir de dos solventes, metanol y acetato de etilo.

Para establecer una comparativa analítica con relación a la eficiencia que posee el Chañar como inhibidor de corrosión, se analizó el volumen cero del extracto acuoso y distintos volúmenes de inhibidor de Chañar en el acero estudiado, con el fin de evaluar las tasas de corrosión complementadas con análisis morfológicos para el acero AISI 1020.

El seguimiento de la corrosión se determinó mediante el empleo de técnicas electroquímicas de voltaje de circuito abierto y espectroscopia de impedancia electroquímica, en conjunto con la aplicación de un circuito equivalente. A su vez, el análisis morfológico obtenido, se obtuvo mediante la utilización del equipo de microscopia electrónica de barrido (MEB).

Los resultados revelaron que para el caso del extracto de Chañar utilizando metanol la tasa, en promedio, aumentó la velocidad de corrosión a un 16,20%, lo que significa que se favorece el fenómeno de corrosión o en su caso la pérdida de material del acero. Por otro lado, el extracto acuoso en base al acetato de etilo nos entregó un resultado, en promedio, de disminución en la velocidad de corrosión hasta un 20,41%. En base a los resultados obtenidos en el estudio, se logra concluir que la utilización de la hoja de Chañar de la Región de Atacama no es eficaz como inhibidor de corrosión, inclusive queda demostrado que puede llegar a favorecer este fenómeno. Análisis mediante MEB corroboraron estos resultados mostrando una degradación del acero en presencia del inhibidor.

ABSTRACT

The purpose of this study is to establish the capacity of the Chañar leaf in the commune of Copiapó, Chile, as a corrosion inhibitor for an AISI 1020 carbon steel exposed in a 1 M NaCl salt solution.

The study to evaluate the efficiency of the corrosion inhibitor on the steel in a medium of high salinity was carried out based on aqueous extracts of Chañar from two solvents, methanol and ethyl acetate.

To establish an analytical comparison regarding the efficiency of Chañar as a corrosion inhibitor, the zero volume of the aqueous extract and different volumes of Chañar inhibitor in the steel studied were analyzed, in order to evaluate corrosion rates and supplemented with morphological analyses for AISI 1020 steel.

Corrosion monitoring was determined using electrochemical open circuit voltage techniques and electrochemical impedance spectroscopy in conjunction with an equivalent circuit application. In turn, the morphological analysis obtained was achieved by using scanning electron microscopy (SEM) equipment.

The results revealed that for the Chañar extract using methanol, the rate, on average, increased the corrosion rate to 16.20%, which means that it favors the phenomenon of corrosion, or in their case, the loss of steel material. On the other hand, the aqueous extract based on ethyl acetate gave us a reduction result in the corrosion rate up to 20.41%, on average. Based on the results obtained in the study, it is possible to conclude that the use of the Chañar leaf of the Atacama Region is not effective as a corrosion inhibitor, even it is shown that it can favor this phenomenon. Analysis by SEM corroborated these results, showing a steel degradation in the presence of the inhibitor.

CAPÍTULO I. MARCO INTRODUCTORIO

1.1 Aspectos generales

El Chañar (nombre científico, *Geoffroea Decorticans*), es una planta que se comporta como arbusto o árbol que alcanza hasta 7 m de alto cuando está aislado, y cuando crece en bosquesillos densos generalmente alcanza una altura de aproximadamente 2 m (Martínez, 1989). Esta especie se adapta a suelos altamente salinos, pero, se establece en diversas clases de suelos naturalmente, además, tiene tolerancia marcada por suelos “salitrosos” donde predominan los sulfatos y cloruros (Martínez, 1989). Esta planta se puede reproducir por semillas o por raíces gemíferas (Giménez et al., 2013), además que es facultativamente xenógama, por lo tanto, la polinización se produce mediante la participación de polinizadores (aprox. 70%) o sin ellos (aprox. 30%) (Eynard & Galetto, 2002). El fruto del Chañar se utiliza ampliamente para preparar “arrope” (un extracto dulce parecido a la miel), harina, galletas, mermeladas y jalea. Algunos estudios medicinales han demostrado que el extracto acuoso de la fruta y arrope posee efectos antinociceptivos, antitusivos y expectorantes (Reynoso et al., 2016).

El Chañar es una especie sudamericana, de amplia distribución geográfica, la que se extiende por el sur de Perú y Bolivia, norte de Chile, Chaco Paraguayo, oeste de Uruguay y la mayor parte de Argentina (Giménez, 2009). En Chile, la especie se encuentra desde la región de Arica-Parinacota (Valle de Lluta y Azapa), hasta la región de Coquimbo (31°10' latitud sur), encontrándose individuos entre los 500 y 1.500 m.s.n.m., pero también a nivel del mar en la desembocadura del Río Copiapó (Martínez, 1989), sin embargo, también se han encontrado individuos en San Pedro de Atacama a 2.280 m.s.n.m. (Contreras et al., 2018; Contreras et al., 2019). No obstante, hay registro de chañares hasta los 2.470 metros de altitud en el poblado de Toconao, Chile.

La corrosión es un deterioro del material metálico debido a procesos electroquímicos entre el metal y su entorno que implica la transferencia de electrones desde el ánodo al cátodo (Jones, 1992). Este es un fenómeno que afecta fuertemente a la economía, donde los gastos generados por el control y prevención de este problema son enormes y se estima que corresponden entre el 2 y 4% del producto interno bruto (PIB) de un país industrializado (Huu, 2004; Abdel-Gaber et al., 2006). Los riesgos más prominentes, tanto

económicos como ambientales y sociales, se presentan en las grandes instalaciones industriales, como centrales eléctricas o plantas de procesos químicos. El deterioro de materiales por causa de la corrosión, en muchos casos, es la causante de paradas de plantas de proceso, en adición a la disminución de la eficiencia de los equipos (Abdel-Gaber et al., 2006) y causa de accidentes como incendios, explosiones y liberación de productos tóxicos a la atmósfera, al agua o a la tierra (Chen et al., 2008; Restrepo et al., 2009). Los métodos comúnmente utilizados para evitar la corrosión son; el revestimiento del metal, protección catódica, protección anódica, inhibidor de corrosión, entre otros. El inhibidor de corrosión es una sustancia que generalmente se agrega en el medio ambiente (solución que se encuentra en contacto con el metal) en pequeñas cantidades para retardar el proceso de corrosión del metal. En general, los inhibidores de la corrosión provienen de compuestos orgánicos e inorgánicos que contienen un par de electrones libres, como nitrito, cromato, fosfato, urea, fenilalanina, imidazolina y cualquier otro compuesto de amina. Sin embargo, este producto químico sintético es peligroso tanto para los seres vivos como para el medio ambiente, y también es costoso desde el punto de vista económico. Por estas razones, es que se necesita proporcionar un inhibidor barato, biodegradable, no tóxico y respetuoso con el medio ambiente. Una de las soluciones es utilizar materiales orgánicos como extractos de recursos naturales (Haryono et al., 2010). Hay tantos recursos naturales que existen a nuestro alrededor, como plantas, animales y microorganismo. Sin embargo, las plantas han sido ampliamente utilizadas como materiales de investigación. Es por ello, numerosos estudios se han centran en los diversos compuestos de las plantas, especialmente en los compuestos de metabolitos secundarios, los cuales son utilizados potencialmente en medicina, insecticida natural, material científico y también muchas otras necesidades industriales (Harbourne, 1987).

El acero al carbono es un tipo de acero con diversas aplicaciones, como por ejemplo plantas de energía, transporte, procesamientos químicos, minería, construcción y equipos de procesamiento de metales, entre otras. Este tipo de acero normalmente tienen un contenido de carbono del 1% y sus aleaciones suelen tener menos del 2% de carbono en peso. Dependiendo del contenido de carbono se pueden clasificar en: aceros con bajo contenido de carbono, acero de carbono medio y acero con alto contenido de carbono. Estos tipos de aleaciones son susceptibles a la corrosión, en especial la atmosférica, ya

que, si son expuestos a ambientes industriales salinos o de alta humedad presentarías deterioro, por lo tanto, funcionan mejor en lugares secos. También sufren de corrosión cuando se encuentran inmersos en un medio acuoso. Como se indicó anteriormente, el acero al carbono AISI 1020, usualmente se emplea en ejes, eslabones, cadenas, pasadores, bujes, cementados, cañerías de transporte de agua, tanques almacenadores, entre otras. Este tipo de acero se clasifica en aceros con bajo contenido de carbono (%masa 0,18-0,23 C), por lo que presentan ciertas características, diferenciándose de las otras, por ejemplo, son más débiles y blandos lo que conlleva a que sean dúctiles, esto significa que sean más fáciles de soldar por un bajo costo.

En este trabajo se estudió el uso de extracto de hojas de Chañar, como inhibidor de la corrosión del acero al carbono AISI 1020 en soluciones de elevada salinidad. Técnicas electroquímicas como voltaje de circuito abierto e impedancia electroquímica, así como caracterización morfológica del acero se utilizaron para validar la hipótesis de la capacidad de inhibición que tienen los compuestos activos del Chañar. Se utilizó un solvente de polaridad alta como metanol y polaridad media tal como el acetato de etilo para la extracción de componentes activos desde las hojas de Chañar.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Estudiar el extracto del Chañar como sustancia eficiente para inhibir la corrosión en aceros al carbono en una solución de elevada salinidad.

1.2.2 Objetivos específicos

- 1) Obtener un extracto acuoso de hojas del Chañar con el extractor Soxhlet, utilizando como solvente metanol y acetato de etilo.
- 2) Evaluar el efecto del extracto del Chañar sobre la tasa de corrosión del acero al carbono AISI 1020 en una solución salina 1 M NaCl.
- 3) Caracterizar los patrones morfológicos del acero al carbono en presencia y ausencia del extracto del Chañar y relacionarlos con las tasas de corrosión.

1.3 Hipótesis

El extracto de las hojas del arbusto o árbol de Chañar, ubicado en el norte de Chile, ayudaría a inhibir la corrosión del acero al carbono en una solución de NaCl, es decir, que actúa en el control y prevención del fenómeno de corrosión en un acero al carbono, generando una capa protectora adsorbida en la superficie del electrodo AISI 1020, ya que la corrosión afectaría en el deterioro del material y de sus propiedades, se analizará mediante un proceso electroquímico que abarca el electrodo y la solución que contiene el extracto de planta.

1.4 Planteamiento del problema

La corrosión es un fenómeno que significa el deterioro de una aleación o metal, debido a su interacción con el medio ambiente a través de una reacción electroquímica. En particular la corrosión de acero al carbono es perjudicial, por el simple hecho que este se encuentra en toda área, desde instalaciones industriales hasta en nuestros hogares. Por lo tanto, este fenómeno afecta la economía, el medio ambiente y lo social.

Es casi imposible evitar la corrosión, sin embargo, es posible controlarla. Es por esto, que entre los diferentes métodos de prevención y control, el uso de inhibidores de corrosión es de gran ayuda para este fenómeno, no obstante, algunos inhibidores son tóxicos, costosos y dañinos para el medio ambiente y el ser humano. Por lo cual, se busca utilizar inhibidores de corrosión que sean ambientalmente amigables y de bajo costo, siendo principalmente los inhibidores en base a productos naturales los que cumplen con estas características.

En el caso del presente estudio, se planteará el uso de un inhibidor de corrosión en base a una planta de la zona (Región de Atacama, Chile) llamada *Geoffroea Decorticans* y denominada Chañar.

1.5 Justificación

El estudio se realizó por la existencia de la corrosión en metales o aleaciones, esto significa el deterioro del material, lo que conlleva aplicar distintos métodos para detener o disminuir este ataque destructivo, dentro de estos métodos se encuentra la aplicación de inhibidores de corrosión. Existe una variedad de inhibidores de corrosión, pero los más

favorables son los que se basan en compuestos orgánicos, como son las plantas. Es de suma importancia aplicar métodos que eviten o ralenticen la corrosión, ya que este fenómeno es perjudicial en varios ámbitos, es por ello que se estudia y aplica el uso de extractos de plantas para futuros inhibidores, siendo estos menos tóxicos, económicos y eficientes.

1.6 Delimitaciones

En el presente trabajo solo se efectuó extracciones de hojas del Chañar. Adicionalmente, se evaluó adiciones variables del extracto entre 5-200 μL y en una solución sintética de 1 M NaCl. Todos los ensayos serán realizados a escala de laboratorio. Se limitará al estudio de los extractos, por lo que no se realizará un análisis orgánico de tipo de componentes activos presentes en las hojas del Chañar.

CAPÍTULO II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Corrosión y sus principios Químicos

La corrosión consiste en una reacción química o electroquímica entre un material y su entorno. Esta reacción genera la deterioración en el material expuesto y sus propiedades. En varios metales (no nobles) esta reacción se considera inevitable. La corrosión es la forma en que el metal vuelve a su estado natural, ya que en el proceso de fabricación se requiere de ciertos niveles energéticos. Esto significa que no es un material estable en condiciones ambientales normales y que su condición natural no es presentarse como un sólido cerivalente (Amparo, 2021).

Por oxidación se refiere a la corrosión química y se entiende como la reacción entre gas-metal o líquido-metal al exponer al metal sin protección a la atmósfera. La oxidación ataca al metal y genera una película de óxido que recubrirá la superficie de éste. Se ha observado que esta reacción no genera un deterioro significativo de elementos o barras de acero a nivel estructural antes de dos años, lo cual depende de la presencia de contaminantes en la atmósfera y de su exposición a iones cloruros (Rondon, 2005). La corrosión electroquímica implica reacciones de oxidación y reducción. La oxidación significa la pérdida de electrones, en cambio la reducción significa la ganancia de electrones. Debido a este intercambio de electrones entre las reacciones, es que se genera una corriente eléctrica, la cual permite diferenciarla de la corrosión química.

Las dos semirreacciones que ocurren dentro del fenómeno de corrosión involucran a un metal cualquiera M el cual se oxida usando un oxidante catiónico N^{n+} . A continuación, se expresan ambas semirreacciones, donde la ecuación 2.1 es la semirreacción anódica y la ecuación 2.2 es la semirreacción catódica.



Es importante tener en cuenta estas dos semirreacciones, ya que con ellas se pueden evaluar el comportamiento de los metales frente a un medio agresivo. Basado con esto, la teoría del potencial mixto postula que las reacciones de oxidación y reducción en la

corrosión electroquímica se producen a igual velocidad sobre la superficie metálica (Ugaz y Diaz, 1988). Esta teoría del potencial mixto propone la existencia de un equilibrio, es decir que todos los electrones generados por las reacciones anódicas son consumidos por las reacciones catódicas. Además, no se encuentra presencia de transformaciones neta de especies y tampoco hay transferencia neta de carga. Por consiguiente, se debe cumplir que la densidad de corriente anódica (i_a) es igual a la densidad de corriente catódica (i_c). Acorde a la ecuación 2.3:

$$|i_a| = |i_c| \quad (2.3)$$

La ecuación de Butler-Volmer se usa ampliamente en la teoría electroquímica para describir la relación entre el potencial del electrodo (frente a un electrodo de referencia adecuado) y la densidad de corriente (Dickinson, 2020). La ecuación 2.4 de Butler-Volmer es la siguiente:

$$i_j = i_{0,j} \cdot \exp \left(2.303 \cdot \frac{\eta_j}{b_j} \right) \quad (2.4)$$

En donde, $i_{0,j}$ y b_j corresponden a parámetros cinéticos, y η_j es el sobrepotencial según la reacción.

2.2 Microscopia electrónica de barrido (MEB)

La microscopia electrónica de barrido hace uso del comportamiento de los electrones frente a campos eléctricos y magnéticos ya que este es similar al de la luz visible en espejos y lentes. Precisamente, un haz de electrones acelerados por un alto potencial eléctrico (25.000 Voltios) constituye la fuente de radiación de un microscopio electrónico de barrido (SEM por *Scanning Electron Microscope*). En un microscopio electrónico de barrido la imagen se obtiene a partir de las señales emitidas por la muestra y se va formando a medida que el haz de electrones se desplaza sobre una porción de su superficie. Este barrido se realiza línea por línea sobre una pequeña zona de forma rectangular. Esta zona es la que se visualiza ampliificada en la imagen final. A medida que el haz explora la muestra de

esta manera la intensidad de la señal generada varía según el punto particular analizado en cada instante. La señal detectada puede ser entonces analizada y amplificada, tanto en su forma analógica como digital, y finalmente procesada convenientemente (Ipohorski & Bozzano, 2013).

2.3 Técnicas electroanalíticas

2.3.1 Voltaje de circuito abierto (OCV)

El voltaje de circuito abierto (OCV) hace referencia a toda la celda electroquímica y el potencial de circuito abierto se refiere al electrodo de trabajo. Esta medida consiste en el registro de la evolución del potencial de reposo, es decir, cuando no fluye corriente a través de la celda y se aplica cualquier potencial al electrodo contra un electrodo de referencia o se aplica cualquier diferencia de potencial a la celda. La OCV se utiliza para permitir que el sistema se estabilice durante un corto período antes de aplicar otra técnica electroquímica. Además, la OCV es útil para seguir la formación de biopelículas en el electrodo sin estímulo eléctrico externo (Cardeña et al., 2019).

Dentro de la ciencia de la corrosión la medición del OCV resulta en la medición del potencial de corrosión que a su vez resulta la reacción de corrosión. Además, el voltaje de circuito abierto también permite determinar la concentración de la especie redox de la solución que se encuentra en condiciones de equilibrio que se utiliza en la ecuación de Nernst.

Para determinar el potencial OCV se debe tener en consideración si el sistema utiliza tres electrodos (electrodo de trabajo, electrodo de referencia y electrodo auxiliar o contraelectrodo), donde se obtiene el potencial a partir de la ecuación 2.5.

$$E_{OCV} = E_{trabajo} - E_{referencia} \quad (2.5)$$

Donde E_{OCV} es el potencial del OCV, $E_{trabajo}$ es el potencial del electrodo de trabajo y $E_{referencia}$ es el potencial del electrodo de referencia.

2.3.2 Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS)

La espectroscopia de impedancia electroquímica es una técnica relativamente moderna, ya que se comenzó a aplicar en los años setenta. Debe su existencia a la aparición de circuitos electrónicos suficientemente rápidos y sensibles para generar y analizar una señal de frecuencia y fase variable. Se trata de una técnica no destructiva (cuando se trabaja en condiciones de equilibrio), particularmente sensible a pequeños cambios en el sistema, y que permite la caracterización de las propiedades de materiales y sistemas electroquímicos incluso en medios poco conductores (Vázquez, 2007).

La técnica consiste en la aplicación de una perturbación senoidal de potencial eléctrico de frecuencia variable al material estudiado y el registro de la respuesta en corriente dentro de una celda electroquímica. La impedancia se define como el cociente entre el potencial aplicado y la intensidad medida a la salida (Macdonald y Johnson, 2005). En muchos materiales y sistemas electroquímicos la impedancia varía con la frecuencia del potencial aplicado en una forma que está relacionada con las propiedades de dichos materiales. Esto se debe a la estructura física del material, a los procesos electroquímicos que tengan lugar, o a una combinación de ambos. Por consiguiente, si se hace una medida de impedancias en un rango de frecuencias adecuado y los resultados se representan en unos ejes acorde a los datos obtenidos es posible relacionar los resultados con las propiedades físicas y químicas de los materiales y sistemas electroquímicos. A partir de las mediciones de desfase y de amplitud de la respuesta, es posible obtener la impedancia de transferencia electroquímica del material estudiado (Z^*) (Vázquez, 2007).

La corriente resultante expresada en la ecuación 2.6 tiene la misma frecuencia que el potencial aplicado pero diferente magnitud y fase (Macdonald y Johnson, 2005):

$$Z^* = \frac{E_0}{I_0} = \frac{E_0 \cdot \sin(\omega \cdot t)}{I_0 \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi)} = Z_0 \cdot \frac{\sin(\omega \cdot t)}{\sin(\omega \cdot t + \phi)} \quad (2.6)$$

Donde E_0 es el potencial, I_0 es la intensidad, ω es la frecuencia y ϕ es el desfase. De este modo, la impedancia puede expresarse en función de una magnitud Z_0 y un desfase ϕ .

Al ser la impedancia un número complejo, se puede representar tanto en coordenadas

cartesianas como polares. De la parte real Z' se puede calcular la conductancia G y de la parte imaginaria Z'' la capacitancia C . La relación entre la forma polar y la forma cartesiana se puede observar a partir de las siguientes expresiones 2.7, 2.8 y 2.9 (Macdonald y Johnson, 2005):

$$Z^* = a \cdot \cos(\phi) + b \cdot \sin(\phi)i = Z' + Z'' \cdot i = \frac{1}{G} - \frac{1}{\omega \cdot C} \cdot i \quad (2.7)$$

$$|Z| = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (2.8)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{b}{a} \right) \quad (2.9)$$

La admitancia, que es la inversa de la impedancia, es la función de transferencia del sistema cuando la perturbación senoidal se superpone al potencial aplicado en modo potencioestático, mientras que la impedancia representa la función de transferencia del sistema en modo galvanostático, es decir, cuando la perturbación senoidal se superpone a la intensidad aplicada (Vázquez, 2007).

Existen dos formas de representar gráficamente los resultados de impedancia obtenidos de un ensayo de EIS:

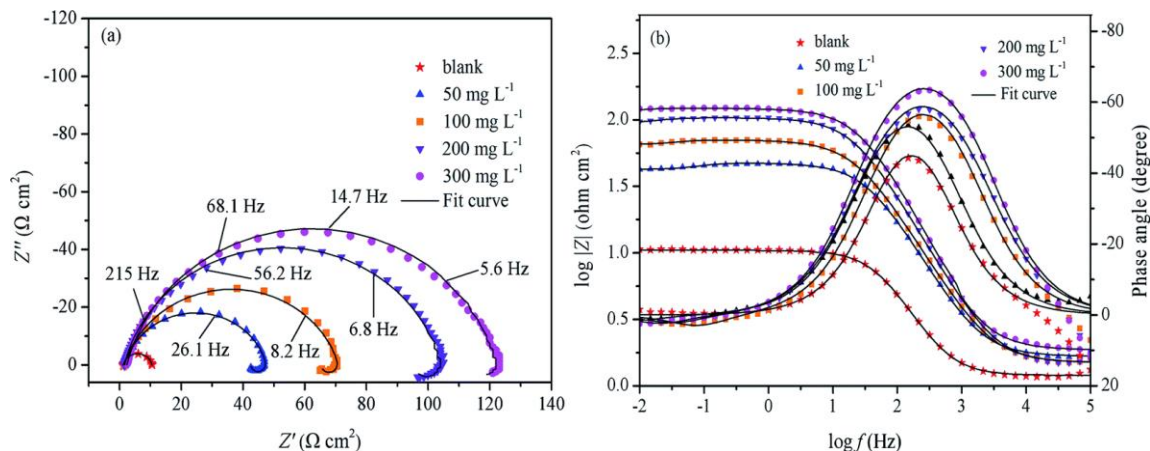
Diagrama de Nyquist, se representa la componente imaginaria multiplicada por -1 ($-Z''$), frente la parte real (Z'). Es el sistema de representación más utilizado y la información que se obtiene de él se basa en la forma que adoptan los espectros (Mora, 2018). A partir del uso de espectroscopia de impedancia electroquímica se obtienen diagramas de Nyquist. En estos diagramas se desglosan distintos parámetros tales como, resistencia eléctrica del electrolito de trabajo (R_Ω), resistencia de polarización (R_p), resistencia de la solución (R_s) y capacitancia de la doble capa electroquímica (C_p). Con aquellos parámetros se pueden efectuar comparaciones y estimaciones para el estudio del fenómeno de corrosión.

Diagramas de Bode, donde se representan el logaritmo del módulo de la impedancia ($\log |Z|$) y el desfase (ϕ) en función del logaritmo de la frecuencia ($\log \omega$). La información que se obtiene de este tipo de representación va encaminada sobre todo al comportamiento en función de la frecuencia (Vázquez, 2007). Al igual que el diagrama de Nyquist se obtienen parámetros tales como, resistencia eléctrica del electrolito de trabajo (R_Ω),

resistencia de polarización con pendiente cero ambas curvas (R_p), y regiones con elementos capacitivos (C_p : capacitancia de la doble capa electroquímica) con pendiente igual a -1.

En la figura 2.1 podemos observar un ejemplo de los diagramas Nyquist y Bode.

Figura 2.1 Diagramas Nyquist y Bode aplicados a un acero dulce en una solución de 0,5 M de H_2SO_4 mediante extracto de hoja de rábano.



Li, 2019.

2.4 Método circuito equivalente para análisis del EIS

La espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) implica estudiar el mecanismo de materiales, electrolitos sólidos, polímeros conductores y protección contra la corrosión midiendo el cambio de impedancia con frecuencia senoidal (Chang y Park, 2010). La imprecisión de la interpretación es probablemente el mayor problema para la tecnología EIS. La construcción de un modelo de circuito equivalente es el método más utilizado para el análisis del EIS (Lasia, 2002). En este método, el sistema electroquímico se considera como un circuito equivalente, que se compone de componentes básicos en serie o paralelo, como resistencia (R), capacitancia (C) y elemento de fase constante (Q), elementos de Warburg finito (T), semi infinito (W) o de borde porosos (O). La estructura de estos circuitos equivalentes y el valor de cada elemento se pueden medir y ajustar. En consecuencia, los detalles de los sistemas electroquímicos y las propiedades de los procesos de electrodos pueden analizarse utilizando el significado electroquímico de esos componentes (Chang y Park, 2010; Lasia, 2002).

La selección del modelo debe reflejar la importancia práctica y las consecuencias se basan en la suposición de que existe un modelo preciso. En la actualidad, el método común es la selección de varios modelos de circuitos equivalentes potenciales de acuerdo con las diferentes aplicaciones, y luego el uso de ajuste matemático para simular el patrón correspondiente. Sin embargo, cuando varios modelos de confianza están disponibles, deben ser ordenados para encontrar el modelo más razonable. Por lo tanto, muchos factores subjetivos y juicios involucrados en el proceso de análisis del circuito de EIS, cómo elegir el modelo de circuito equivalente adecuado es el paso crítico en la tecnología EIS (Zhu et al., 2019).

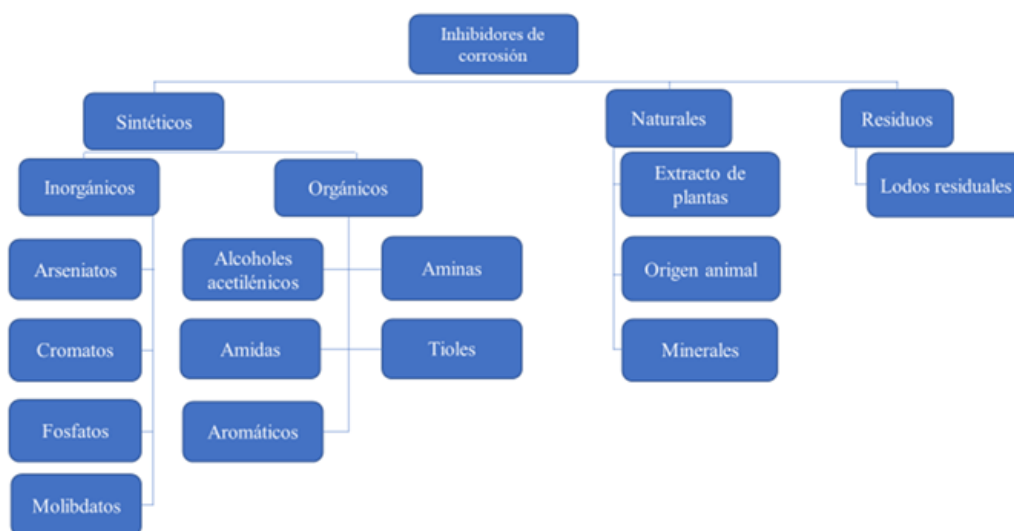
2.5 Inhibidores de corrosión

Un inhibidor de corrosión es una sustancia química que cuando se adiciona en pequeñas concentraciones a un medio corrosivo, disminuye de manera efectiva la velocidad de corrosión (Uhlig y Revie, 2008). Los inhibidores pueden obtenerse desde compuestos orgánicos o inorgánicos, estos se adsorben sobre la superficie metálica para aislar del medio, deteniendo así el proceso de óxido-reducción (Callister, 1996). En general los inhibidores actúan sobre la interfase metal-medio, impidiendo que ocurra el fenómeno de corrosión, a través de dos mecanismos: a) Precipitación de compuestos insolubles sobre la superficie metálica, b) Formación de capas pasivantes adsorbidas.

En el caso de los inhibidores orgánicos se adsorben sobre la superficie del metal o aleación, formando una capa protectora sobre el material, esta capa provoca la reducción de la velocidad de corrosión ya que evita las reacciones anódicas y/o catódicas. La gran mayoría de los inhibidores utilizados actualmente son tóxicos y causan graves peligros medioambientales al desecharlos, por lo tanto, su uso se ha visto limitado por regulaciones medioambientales (Callister, 1996). Es muy común que los inhibidores se utilicen en sistemas cerrados como intercambiadores de calor o radiadores (Fernandez et al., 2013).

En la Figura 2.2 muestra la clasificación de los inhibidores de corrosión, separándose en sintéticos, naturales y residuos.

Figura 2.2 Clasificación de los inhibidores de corrosión de acuerdo con su origen.



Tejada, 2014.

También una forma de clasificar los inhibidores es de acuerdo con su origen, clasificándolos en inhibidores químicos y vegetales. En los inhibidores químicos, su origen proviene de sustancias químicas, generalmente de una mezcla de componentes soluble entre sí. A nivel mundial, son los más utilizados por la industria en la actualidad por la alta eficiencia de inhibición de la corrosión que proporcionan, pero su gran desventaja es su alta toxicidad. Estos inhibidores pueden clasificarse en orgánicos e inorgánicos (Santander, 2018). Por otra parte, los inhibidores químicos orgánicos están compuestos por moléculas carboxílicas con naturaleza polar, por lo que fácilmente son atraídos hacia las zonas donde se crean pares galvánicos productores de la corrosión. Se adsorben química o físicamente, muy frecuentemente la adsorción involucra transferencia de electrones entre la molécula orgánica y el metal (quimiadsorción), este proceso es bastante lento y requiere algún tipo de energía de activación. El proceso de acción del inhibidor ocurre en dos etapas, primero el compuesto orgánico se adhiere a través de sus grupos polares a la superficie del metal y en la segunda etapa se da la formación de iones complejos, formando precipitados sobre la superficie (Kalpakjian et al., 2002).

Inhibidores inorgánicos tienen la característica de actuar como agentes oxidantes que pueden reducirse y actuar a pH entre 6 y 9. Estos tipos de inhibidores son muy tóxicos, costosos por lo que sus usos son restringidos.

Inhibidores naturales, es una alternativa respetuosa con el medio ambiente, como lo son el extracto de plantas, el de origen de animal y el de minerales.

Las distintas partes de la planta, ya sea corteza, hojas, frutas, cáscaras, semillas, raíces, flores e incluso plantas enteras, se usan ampliamente como inhibidores de corrosión (A, Zakeri et al, 2022). Sin embargo, las hojas son la principal fuente de fitoquímicos donde su síntesis ocurre en presencia de energía radiante, agua y CO₂ (ECC Baly, 1921 y M. Schreiner, 2006). Los extractos de plantas se pueden clasificar en tipo acuosos y orgánicos, en donde el tipo acuoso hace referencia que el extracto contiene fitoquímicos polares y el orgánico fitoquímicos no polares. En los últimos 20 años ha aumentado la investigación de este tipo de inhibidor, demostrando que su capacidad inhibidora se atribuye principalmente a la presencia de compuestos orgánicos como *saponinas*, *taninos*, *flavonoides* y *aminoácidos* (Redha, 2013).

2.6 *Geoffroea decorticans*

Geoffroea Decorticans es un árbol o arbusto característico de zonas áridas y semiáridas que se encuentra distribuido en Argentina, Chile, Uruguay, Bolivia y Perú (Cendoya, 2021). Esta especie es considerada uno de los árboles silvestres más importantes para las poblaciones indígenas establecidas en el Desierto de Atacama desde hace más de 4000 años (Ugalde, 2021). *Geoffroea Decorticans* (también llamado Chañar) ha sido reconocido como un recurso polivalente que proporciona alimento y material para muebles y medicamentos expectorantes, anticoagulantes e hipoglucemiantes (Giménez, 2004; Núñez, 2009; Costamagna, 2013; Castro, 2020; Echeverría, 2020; Cotabarren, 2020).

Ensayos realizados por Jimenez-Aspee (Jimenez-Aspee et al., 2017) mediante los métodos habituales de investigación fitoquímica revelaron la presencia de *saponinas*, *flavonoides*, *glúcidos* y *taninos*, los cuales están en concordancia con los obtenidos por Rondina & Coussio (Silva, 2004). Una imagen referencial de las hojas es mostrada en la Figura 2.3.

Figura 2.3 Hojas del Geoffroea Decorticans.



Ugarte, 2007.

2.7 Estado del arte

Las plantas como tal se clasifican en distintas familias, ya sea porque comparten ciertas características, tienen un ancestro en común, entre otros. El Chañar pertenece a la familia de las *fabáceas*, con el conocimiento de aquello se puede encontrar estudios de plantas que permanezcan a esta familia, como es el caso de la planta *Bauhinia purpurea*.

Investigadores provenientes de Brasil (Bezerra et al., 2015) tuvieron como objetivo investigar si la planta de la zona actuaba como inhibidor de corrosión para un acero al carbono. El estudio inicio recolectando de la selva tropical brasileña la *Bauhinia purpurea*, la cual fueron secadas por 7 días y pulverizadas generando una cantidad de 700,0 g. El extracto acuoso se obtuvo mezclando las hojas secas y pulverizadas con metanol a temperatura ambiente, este se filtró y se evaporó al vacío. El procedimiento electroquímico se dio lugar en una celda termostatzada de tres electrodos, un electrodo de referencia de calomelano saturado (SCE), un electrodo auxiliar de platino y un electrodo de trabajo de acero al carbono UNS G10200. La concentración del electrolito fue de $1.0 \text{ mol L}^{-1} \text{ H}_2\text{SO}_4$ y los experimentos se realizaron en 200 mL de electrolito a 25°C . En el caso de extracto de planta se agregó de 50 a 500 mg L^{-1} , con el objetivo de poder analizar la protección del acero al carbono. Los resultados de aquella investigación demostraron mediante las curvas de polarización que este extracto actuó como un

inhibidor de adsorción disminuyendo las corrientes de densidad anódica y catódica. Las mediciones de pérdida de peso mostraron que el extracto permaneció estable durante al menos 72 h. El proceso de adsorción de este extracto obedece a la isoterma de adsorción de Langmuir. Por último, el diagrama de Arrhenius sugirió la adsorción física del extracto.

Para el caso de la planta *Geoffroea Decorticans* proveniente del norte de Chile fue caso de estudio por investigadores provenientes de Chile (Díaz et al., 2020) donde investigaron si la fruta del Chañar actuaba como inhibidor de corrosión en un acero A36 en un ambiente salino. Para medir su eficiencia como inhibidor se evaluó mediante pérdida de masa, curvas de polarización y espectroscopia de impedancia electroquímica, y además de un análisis morfológico de la superficie del acero. El extracto presentó una eficiencia de inhibición de 82% a una concentración de 200 ppm.

En otro estudio se evaluaron los tallos de dos especies, *Eulychnia acida* (Copao) y *Echinopsis chiloensis* (Quisco) de la región centro-norte de Chile para inhibir la corrosión del acero al carbono en soluciones de 0,1 M HCl (Figueredo et al., 2019). Primeramente, realizaron estudios sobre los fitoquímicos mediante cromatografía líquida de alta resolución-espectrometría de masas para ambos tallos que contienen fenoles y flavonoides. Luego, evaluaron la eficiencia de inhibición mediante la pérdida de masa, curvas de polarización de Tafel y espectroscopia de impedancia electroquímica, llegando a un porcentaje de inhibición de un 88% con el uso de una concentración de extracto de 1500 ppm. Análisis morfológicos demostraron que en presencia del extracto se observó la formación de una fina película protectora sobre el acero, y sin la presencia del extracto se observó la corrosión del HCl.

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

En el presente capítulo se tratará de la metodología que se realizó en este estudio, donde abarca los materiales y equipos que se utilizaron, la preparación del extracto acuoso de Chañar y de la solución salina de cloruro de sodio, las técnicas electroquímicas, electroanalíticas y morfológicas y finalmente expresiones matemáticas de importancia para la posterior análisis y evaluación del fenómeno de corrosión.

3.1 Materiales y Equipos

3.1.1 Materiales

En el estudio se utilizaron extractos de plantas provenientes del arbusto o planta Chañar, de la comuna de Copiapó, Chile. De aquella planta se extrajeron de manera manual sus hojas, los cuales se secaron en una estufa universal (Memmert UN75) durante 24 h a 40 °C. El estudio de corrosión utilizó como prueba un electrodo de acero al carbono tipo AISI 1020 (%masa: 0,18-0,23 C, 0,1-0,35 Si, y 0,3-0,6 Mn con trazas de S, Si, Cu, Ni, Sn, P, Mo, y Fe como balance). Para ello, se fabricaron electrodos envainados en una vaina de plástica de tal forma que solo una cara transversal esté expuesta a la solución agresiva. Esta cara visible del acero en el electrodo de trabajo se sometió previamente a una limpieza mecánica a través de un proceso de pulido utilizando papel lija desde el grano #800 hasta #1200, para posteriormente lavarlo dentro de un vaso precipitado con alcohol isopropílico posicionado en el interior de un limpiador ultrasónico durante 5 a 10 s, y una vez finalizado se enjuagó con agua desmineralizada.

3.1.2 Equipos

Para pesar el material orgánico seco se utilizó una balanza analítica Quimis y para obtener el extracto acuoso se utilizó un extractor Soxhlet. En tanto para las pruebas electroquímicas se utilizó un potenciostato BIOLOGIC VSP-300 y para pulir la superficie de los electrodos se utilizó una pulidora ECOMET 3 en conjunto con alúmina como medio pulidor. Los análisis electroquímicos se analizaron en una interfaz electroquímica EGYG. Finalmente, para el análisis morfológico se utilizó un microscopio electrónico de barrido (MEB) modelo Zeiss EVO MA 10.

3.2 Preparación del extracto acuoso

En este estudio se utilizó el método de extracción sólido-líquido mediante el equipo extractor Soxhlet. Este proceso se basó en un lavado sucesivo de las hojas del Chañar con metanol y acetato de etilo (solventes). En la Figura 3.1 se muestra una ilustración esquemática del equipo de extracción, en donde se comienza ingresando dentro de la cámara de extracción un dedal de papel filtro que contuvo 25,0 g de hojas del Chañar, luego la cámara de extracción se conectó por la parte superior a un condensador y por la parte inferior a un matraz de fondo redondo. Previamente en el matraz se le ingreso 200,0 mL de solvente (acetato de etilo o metanol), el cual debió ser calentado hasta llegar a su punto de ebullición (77,1 °C y 64,7 °C en el caso del acetato de etilo y metanol, respectivamente) de tal manera que el vapor del solvente logro recorrer el conducto de vapor que se dirige al condensador, desde donde las gotitas condensadas cayeron sobre las hojas del Chañar en la cámara de extracción, hasta llenarse con el solvente por encima del tubo de sifón. Este proceso se realizó en un ciclo continuo lo que conllevó que el solvente se mantuvo recirculando durante 24 h.

Figura 3.1 Extracción acuosa en extractor Soxhlet.



Creación propia, 2023.

Finalizado el proceso de extracción, la solución obtenida se ingresó a vasos precipitados para continuar con el proceso de evaporación. Este proceso se realizó mediante el uso de agitadores mecánicos que permitieron ajustar la temperatura para la solución. La temperatura usada fue de 60 °C para alcanzar un volumen de 30 mL de solución.

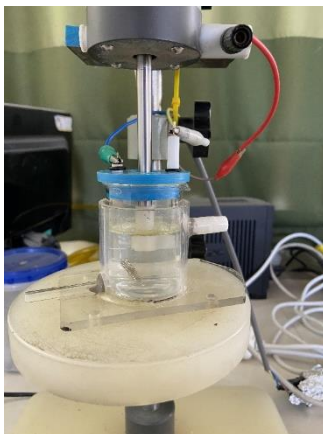
3.3 Preparación de la solución salina

La solución salina del estudio se preparó mezclando 58,4 g de cloruro de sodio (peso molecular de NaCl 58,4 g/mol) con 1 L de agua desmineralizada para obtener una solución de 1 M. La solución se mantuvo a temperatura ambiente (20 a 25 °C).

3.4 Análisis electroquímico

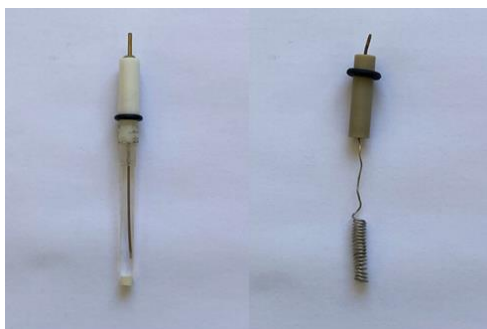
Los estudios del fenómeno de corrosión se realizaron mediante el uso de una celda electroquímica (Figura 3.2), en conjunto al uso de un electrodo de referencia de Ag/AgCl (Figura 3.3.a), un contraelectrodo de platino (Figura 3.3.b) y un electrodo de trabajo de acero al carbono AISI 1020 (Figura 3.4). Las mediciones de voltaje de circuito abierto se realizaron durante 1 h. Además, los ensayos por espectroscopia de impedancia electroquímica se hicieron en un rango de 100 kHz a 1 mHz considerando una amplitud de 20 mV. Para asegurar la conexión eléctrica entre el electrodo de acero al carbono y la interfaz rotatoria, se le introdujo un trozo de alambre de cobre al electrodo de trabajo en la parte vacía de esta y se enroscará en la interfaz indicada, luego de esto el electrodo de trabajo junto con los otros electrodos se insertaron en un vaso precipitado con un volumen del extracto acuoso a estudiar. Hecho este paso, se conectaron los cables a sus respectivos electrodos y se iniciaron la toma de datos. El equipo estuvo sujeto a una agitación de 2000 rpm. El análisis electroquímico se realizó en un volumen de 40 mL de una solución de NaCl con una molaridad de 1 M, con distintos volúmenes de extracto (200, 100, 50, 25, 10 y 5 µL) para los solventes acetato de etilo y metanol. También se realizó una prueba sin inhibidor, es decir solo con la solución de NaCl de 1 M en un volumen de 40 mL.

Figura 3.2 Celda electroquímica.



Creación propia, 2023.

Figura 3.3 Electrodo de referencia de Ag/AgCl (a) y electrodo auxiliar o contraelectrodo de platino (b).



a

b

Creación propia, 2023.

Figura 3.4 Electrodo de trabajo de acero al carbono tipo AISI 1020.



Creación propia, 2023.

3.5 Análisis morfológico

Para la evaluación del daño morfológico sobre el acero al carbono, se utilizó un microscopio electrónico de barrido (MEB) (Zeiss EVO MA 10). Para ello, se evaluó muestras de acero en presencia y ausencia del extracto de Chañar.

3.6 Determinación eficiencia del inhibidor

La determinación de la eficiencia del inhibidor se obtuvo por ensayos de espectroscopia de impedancia electroquímicas, donde al aplicar esta técnica se procedió a utilizar el método de circuito equivalente para la obtención de distintos componentes básicos que permitieron obtener la eficacia del inhibidor.

La evaluación de la capacidad de inhibición se determinará a partir de la siguiente expresión:

$$\eta_{inh} \% = \left(\frac{RT' - RT^0}{RT'} \right) \cdot 100\% \quad (3.1)$$

Donde, RT' y RT^0 corresponde a las resistencias totales en presencia y ausencia de inhibidor, respectivamente, y determinadas desde los ensayos por impedancia electroquímica.

3.7 Determinación tasa de corrosión a través de EIS

La tasa de corrosión es la velocidad a la que el metal se deteriora, otra manera de definirlo es la cantidad de espesor perdida por año. La velocidad de corrosión depende de distintos factores, tales como condiciones ambientales y del tipo y condición del metal.

A través del método de circuito equivalente aplicado al diagrama Nyquist obtenida mediante la técnica de espectroscopia de impedancia (EIS), se puede obtener la intensidad de corriente donde se determinará con la siguiente expresión:

$$I_{corr} = \frac{\beta_a \cdot \beta_c}{2,303 \cdot (\beta_a + \beta_c) \cdot RT} \quad (3.2)$$

Donde I_{corr} es la intensidad de corriente en unidades de Ampere, β_a y β_c son las

constantes de Tafel anódicas y catódicas en unidades de voltios respectivamente, con valores de $\beta_a = \beta_{Fe} = 0,078$ V/dec y $\beta_c = \beta_{O_2} = -0,113$ V/dec y RT son las resistencias totales en unidades de ohmios. Cabe destacar que los constantes de Tafel anódicas y catódicas fueron extraídas desde la literatura para la solución estudiada de 1 M NaCl (Soliz y Cáceres, 2015).

La tasa de corrosión se determinará con la siguiente expresión:

$$V_{corr} = \frac{PM \cdot I_{corr}^{x \mu L}}{F \cdot z \cdot \rho \cdot A} \cdot (3,1536 \times 10^8) \quad (3.3)$$

Donde V_{corr} es la tasa de corrosión en unidad de milímetros por año (mmpy), PM es el peso molecular del hierro con valor 55,845 g/mol, $I_{corr}^{x \mu L}$ es la intensidad de corriente dependiendo del volumen utilizado de inhibidor en unidad de Amperios, F es la constante de Faraday con valor de 96.485 C/mol, z son los electrones intercambiados en la oxidación del hierro equivalente a 2 y es adimensional, ρ es la densidad del hierro con valor de 7,87 g/cm³ y A es el área del electrodo con valor de 0,394 cm² (con un diámetro de 0,708 cm), la constante de $3,1536 \cdot 10^8$ es un factor de conversión para pasar de cm/s a mmpy. Cabe destacar que para trabajar con segundos se utilizará la conversión 1C=1A*s.

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En el presente capítulo se expondrán los resultados obtenidos a partir de técnicas electroanalíticas aplicadas sobre un electrodo de acero al carbono, el cual estuvo inmerso en distintos volúmenes de inhibidor y una solución salina, a su vez se aplicaron técnicas matemáticas y técnicas de caracterización con el fin de estudiar el fenómeno de corrosión sobre la superficie del mismo acero AISI 1020.

Antes del análisis y discusión de resultados es importante hacer mención de algunos procedimientos realizados. Si bien el informe detallo el uso del extractor Soxhlet con distintos solventes que fueron, metanol y acetato de etilo para las hojas del Chañar, en la experiencia no fueron los únicos utilizados, además de ellos se realizó con hexano y diclorometano, sin embargo, su uso no fue exitoso ya que no extrajeron todos los fitoquímicos de la hoja. También se realizó la extracción con el extractor Soxhlet de los frutos del Chañar, pero los distintos solventes no fueron capaces de extraer los fitoquímicos del fruto. La solución salina de NaCl utilizado en análisis electroquímico indicado en el informe fue de 1 M, sin embargo, no fue el único utilizado también se utilizó 0,5, 2 y 4 M para los extractos acuosos de Chañar con metanol y acetato de etilo, al estudiar la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) indicó que la resistencia a la corrosión era baja para los distintos volúmenes utilizados (5, 10, 25, 50, 100 y 200 μL). Es por eso que se continuó con lo indicado en el Capítulo III.

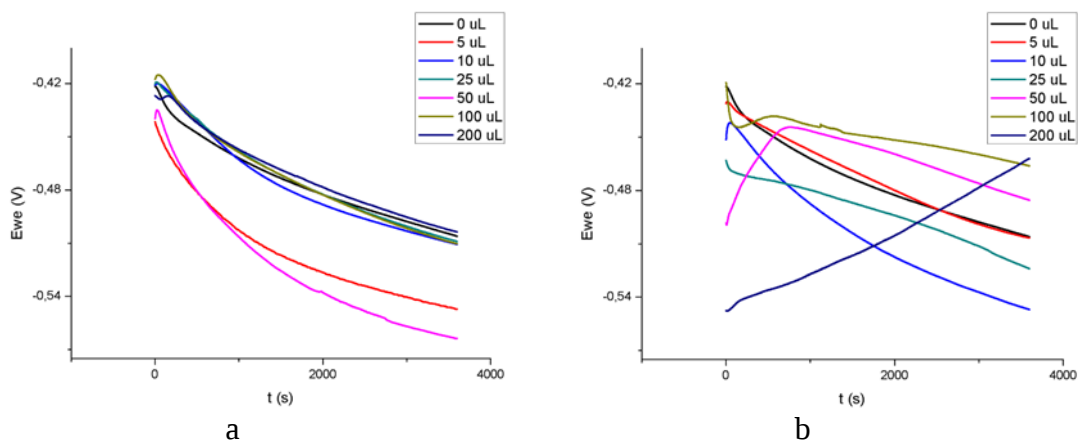
4.1 Resultados de las mediciones electroanalíticas a través de OCV

Las curvas que se obtuvieron a partir de las mediciones electroanalíticas de voltaje de circuito abierto para cada extracto acuoso proveniente de la planta Chañar a distintos volúmenes (0, 5, 10, 25, 50, 100 y 200 μL) se observan en la Figura 4.1. Según el solvente utilizado, la Figura 4.1.a muestra las curvas obtenidas con metanol y la Figura 4.1.b las curvas obtenidas con acetato de etilo. Los resultados de estas curvas se midieron en potencial (E_{we}) vs tiempo (t), en unidades de voltaje y segundos, respectivamente.

Las curvas que se obtuvieron en la experiencia y reflejadas en las Figuras 4.1.a y 4.1.b, indican estar lejos del equilibrio y que el acero posea una condición de pasivación (incremento en el potencial). Esto puede ser observado por las tendencias en el potencial

a valores negativos con el tiempo, la cual revela una condición de oxidación continua. Para el caso del extracto con metanol, se observan tendencias similares en todos los casos, sin embargo, estas van siendo más negativas en presencia del extracto. En el caso del acetato de etilo, los resultados revelan tendencias similares en todos los casos, a excepción de la observada a 200 μL de extracto, donde un incremento en la curva del potencial puede ser observado. Este último resultado puede ser atribuido a una ligera protección o inhibición del extracto de Chañar sobre el acero. En el Anexo A se registraron los valores del potencial obtenidos en un tiempo inicial (1 s) y un tiempo final (3600 s).

Figura 4.1 Curvas OCV para el acero AISI 1020 en soluciones de 1 M de NaCl con diferentes inhibidores de Chañar y volúmenes. Inhibidor con metanol (a) e inhibidor con acetato de etilo (b).



4.2 Resultados de las mediciones electroanalíticas a través de impedancia (EIS)

Los resultados obtenidos a partir de la técnica de impedancia EIS se presentaron en dos diagramas los cuales fueron el diagrama Nyquist y el diagrama de Bode. La técnica se aplicó para las soluciones preparadas con metanol y para las preparadas con acetato de etilo, ambas a distintos volúmenes (0, 5, 10, 25, 50, 100 y 200 μL).

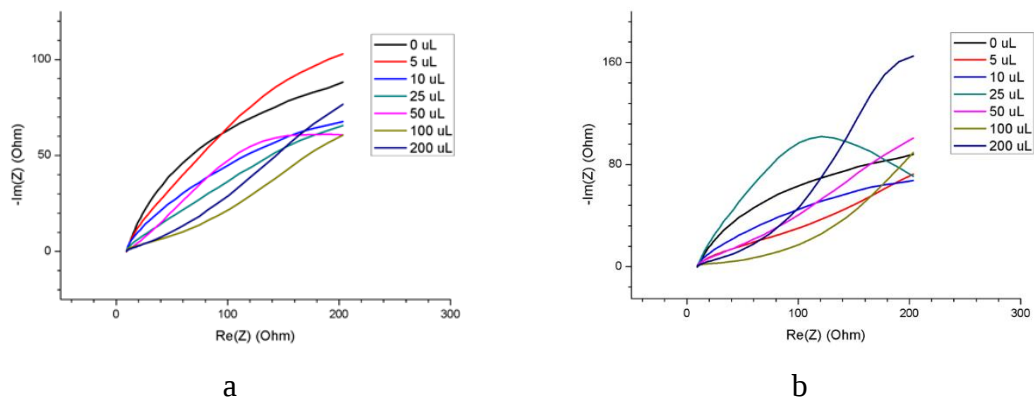
Los diagramas de Nyquist se midieron en resistencia imaginaria ($-\text{Im}(Z)$) vs resistencia real ($\text{Re}(Z)$), en unidades de Ohm ambas, y se pueden observar en la Figura 4.2. Se obtuvieron dos graficas del diagrama de Nyquist distintas para extracto acuoso a partir del solvente metanol (Figura 4.2.a) y para el solvente acetato de etilo (Figura 4.2.b), cada uno de los diagramas registraron las curvas para cada volumen de inhibidor de extracto de Chañar utilizado.

Por otro lado, los diagramas de Bode entregaron dos curvas distintas donde, un diagrama indica el logaritmo de la magnitud de la impedancia ($\log|Z|$) vs el logaritmo de la frecuencia ($\log(\text{freq})$) (ver Figura 4.4), y el otro diagrama indica la variación de fase ($\text{Phase}(Z)$) vs el logaritmo de la frecuencia ($\log(\text{freq})$) (ver Figura 4.5). Debido a lo anterior, es que para el caso del diagrama de Bode, se obtuvieron 2 graficas para cada solvente, en las que se observa la variación de su comportamiento a medida que se fue variando el volumen de la solución en cada solvente. Al igual que el diagrama de Nyquist se registraron las distintas curvas para los distintos volúmenes utilizados de inhibidor de extracto de Chañar.

4.2.1 Diagrama de Nyquist

El diagrama de Nyquist representado en la Figura 4.2.a presenta las curvas obtenidas con el solvente metanol a distintos volúmenes que fueron variando de 0, 5, 10, 25, 50, 100 y 200 μL , en donde se puede observar como las curvas que cuentan con presencia del inhibidor están por debajo de la curva en ausencia de inhibidor (0 μL) revelando una menor resistencia a la corrosión en presencia del extracto. Sin embargo, para el volumen de 5 μL la curva en cierto punto está por encima de la curva de 0 μL , lo cual puede indicar un leve comportamiento de inhibición a la corrosión en esas condiciones. En el caso del diagrama de Nyquist representado en la Figura 4.2.b correspondiente al extracto de Chañar proveniente del solvente acetato de etilo a diferentes volúmenes (0, 5, 10, 25, 50, 100 y 200 μL), en donde se observa que las curvas están por debajo de la curva de 0 μL , con excepción de los casos de los volúmenes de 25 μL que en cierto punto está da por encima de la curva de 0 μL indicando con ello un comportamiento inhibidor a la corrosión, y el volumen de 200 μL que en cierto punto se muestra por encima de la curva de 0 μL , demostrando también un leve comportamiento de inhibidor a la corrosión. Estos resultados reflejan la impedancia que esta de la mano del concepto resistencia que permite evaluar el fenómeno de corrosión, en el caso del uso del extracto de Chañar con solventes como el metanol y acetato de etilo presentaron nula y/o bajas resistencia a la corrosión a los distintos volúmenes utilizados.

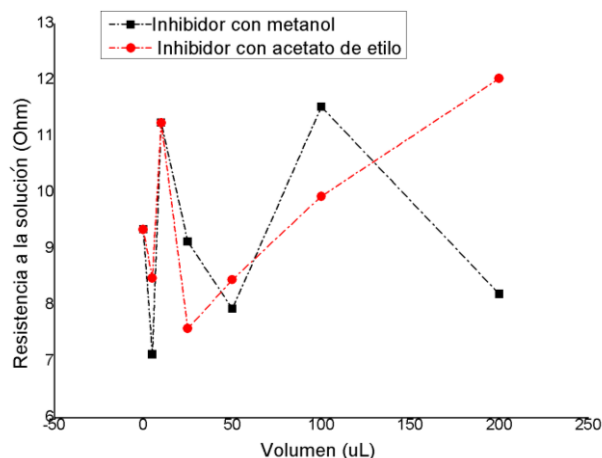
Figura 4.2 Diagrama Nyquist para el acero AISI 1020 en soluciones de 1 M de NaCl con diferentes inhibidores de Chañar y volúmenes. Inhibidor con metanol (a) e inhibidor con acetato de etilo (b).



El caso ideal era esperar que los distintos volúmenes utilizados de inhibidor de Chañar tanto para los solventes de metanol y acetato de etilo dieran por encima de la curva sin la presencia de inhibidor (0 μL), ya que significaría la formación de la capa protectora que se formaría en el electrodo de trabajo evitando el fenómeno de corrosión.

Por otra parte, se evaluó la resistencia a la solución, que se midió cuando la resistencia imaginaria es igual a cero ($-\text{Im}(Z) = 0 \text{ Ohm}$) de tal manera de registrar el valor de la resistencia real, equivalente a la resistencia de la solución, con el objetivo de conocer la resistencia para los distintos volúmenes (0, 5, 10, 25, 50, 100 y 200 μL). En los resultados presentados en la Figura 4.3, se puede indicar que para el inhibidor con metanol se observó una máxima de resistencia a la solución a un volumen de 100 μL y para el inhibidor con acetato de etilo se observó un máximo de resistencia a la solución con 200 μL . Paralelamente, se observó una resistencia a la solución similar para ambos inhibidores a un volumen de 10 μL , también se observó que en el caso del inhibidor con metanol los volúmenes de 5, 25, 50 y 200 μL y para el inhibidor con acetato los volúmenes de 5, 25 y 50 μL dieron por debajo a la resistencia a la solución con un volumen de 0 μL (sin presencia de inhibidor). Además, los volúmenes añadidos no presentaron un orden sucesivo para ninguna de los inhibidores, esto puede estar sujeto a cambios de conductividad de la solución debido a cambios que ocurren entre la interfaz electrodo de trabajo y el electrolito por adición de inhibidor a la celda electroquímica.

Figura 4.3 Resistencia a la solución presentada para cada inhibidor de Chañar a diferentes volúmenes.



4.2.2 Diagrama de Bode ($\log|Z|$ vs $\log(\text{freq})$)

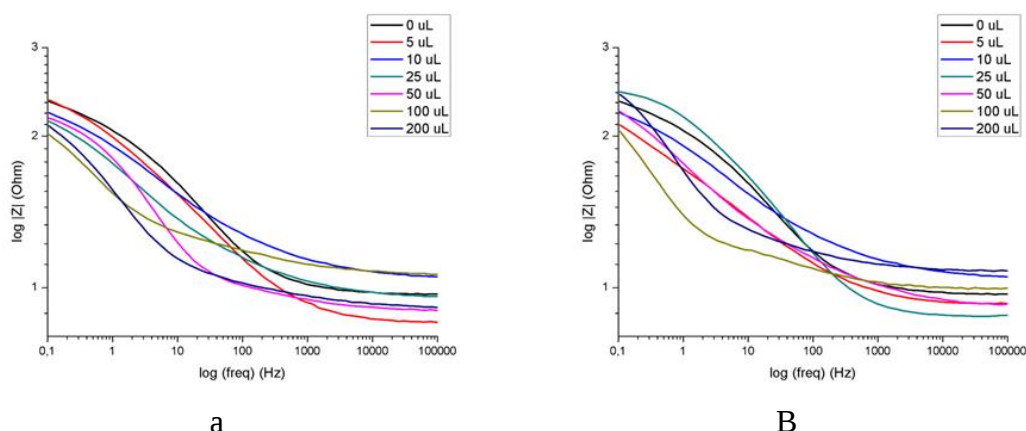
Los diagramas de Bode (impedancia- frecuencia) de los dos extractos de Chañar se pueden observar en la Figura 4.4 para los inhibidores con solvente metanol (Figura 4.4.a) y con solvente acetato de etilo (Figura 4.4.b).

Estos diagramas resultantes de Bode presentaron una forma sigmoidea en sus curvas para los distintos volúmenes de extracto acuoso de Chañar. Las curvas graficadas mostraron una tendencia distinta una de otra. Se puede percibir que para ambos diagramas se cumple lo siguiente, que para valores bajos de frecuencias ($\log(\text{freq})$) se presentaron valores altos de impedancia ($\log|Z|$) y viceversa, para valores altos de frecuencia se presentaron valores bajos de impedancia. La diferencia entre las curvas sigmoideas de cada volumen de inhibidor se expone a través de sus pendientes, al mostrarse algunas más pronunciadas que otras.

Ambos diagramas de Bode (Figura 4.4.a y Figura 4.4.b) se analizaron con respecto a la curva sin inhibidor (0 μL). En el caso del inhibidor con metanol (Figura 4.4.a) se mostró que para valores altos de $\log|Z|$ y valores bajos de frecuencia las curvas de los distintos volúmenes de extracto adheridas dieron por debajo al de 0 μL , sin embargo, los volúmenes de 10, 25, y 100 μL dieron por encima del volumen cero de inhibidor al disminuir los valores de $\log|Z|$ y al aumentar la frecuencia, presentando un cambio a la mitad de recorrido de la frecuencia. En el caso del inhibidor con acetato de etilo (Figura 4.4.b) se mostró que para valores altos de $\log|Z|$ y valores bajos de frecuencia las curvas de los

distintos volúmenes de extracto de Chañar dieron por debajo al de 0 μL , excepto la de 25 μL que inicialmente esta sobre de ella, sin embargo, los volúmenes de 10, 100 y 200 μL al disminuir los valores de $\log|Z|$ y aumentar los valores de frecuencia dieron por encima del nulo volumen de inhibidor, y al principio donde el volumen de 25 μL dio por encima de ella dio un cambio rotundo y paso a estar debajo de la curva sin inhibidor. Cada una de los volúmenes añadidos representadas en los diagramas de Bode de $\log|Z|$ vs $\log(\text{freq})$ dieron pendientes o pronunciaciones distintas, alejándose de la semejanza.

Figura 4.4 Diagrama de Bode (impedancia- frecuencia) para el acero AISI 1020 en soluciones de 1 M de NaCl con diferentes inhibidores de Chañar y volúmenes. Inhibidor con metanol (a) e inhibidor con acetato de etilo (b).



4.2.3 Diagrama de Bode (Phase(Z) vs log(freq))

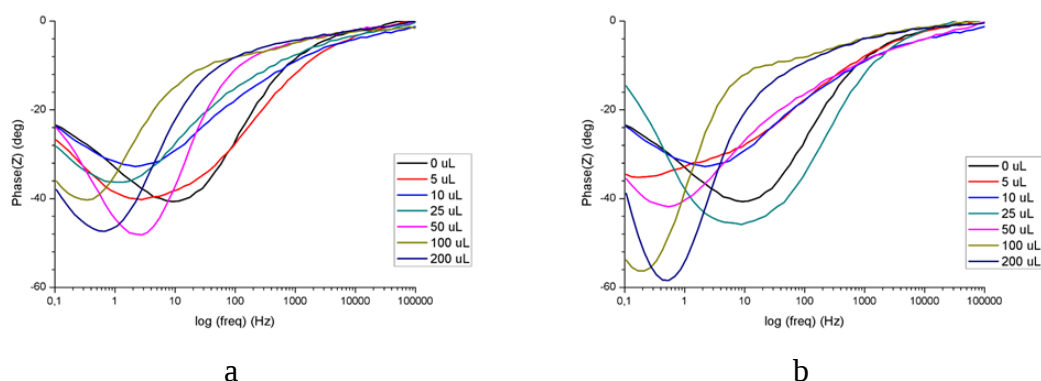
Los diagramas de Bode (ángulo de fase-frecuencia) de los dos extractos de Chañar se pueden observar en la Figura 4.5 para los inhibidores con solventes metanol (Figura 4.5.a) y con solvente acetato de etilo (Figura 4.5.b).

Ambos diagramas mostraron tendencias distintas a las variaciones de los volúmenes de inhibidores.

En el caso del inhibidor con metanol (Figura 4.5.a) para una frecuencia inicial cercano a 0,1 Hz presento valores de ángulos de fase en un rango de -23 a -38 grados para los distintos volúmenes de extracto acuoso de Chañar (0, 5, 10, 25, 50, 100 y 200 μL), y para valores cercanos a 100000 Hz el ángulo de fase tiene valores cercanos a cero. Existen distintos volúmenes de inhibidor de Chañar con metanol que alcanzaron valores de ángulo de fase menores que la mínima alcanzada por la nula presencia de inhibidor (0 μL) las

cuales fueron 50 y 200 μL . Para el inhibidor con acetato de etilo (Figura 4.5.b) para una frecuencia inicial cercano a 0,1 Hz presento valores de ángulos de fase en un rango de -15 a -53 grados para los distintos volúmenes de extracto acuoso de Chañar, ya para valores finales, cercanos a 100000 Hz el ángulo de fase tiene valores cercanos a cero. Para ambos casos a medida que la frecuencia avanzó los ángulos de fases disminuyeron. Distintos volúmenes de inhibidor de Chañar con acetato de etilo que alcanzaron valores de ángulo de fase menores que la mínima alcanzada por la nula presencia de inhibidor (0 μL) las cuales fueron 50, 25, 100 y 200 μL . Las tendencias de alcanzar valores mínimos entre -15 y -53 grados, asociados a la presencia de una sola campana mínima revelan que existen prioritariamente una sola resistencia a la oxidación, la cual puede estar conformada por la resistencia a la transferencia de carga y la presencia de una película de óxidos.

Figura 4.5 Diagrama de Bode (ángulo de fase-frecuencia) para el acero AISI 1020 en soluciones de 1 M de NaCl con diferentes inhibidores de Chañar y volúmenes. Inhibidor con metanol (a) e inhibidor con acetato de etilo (b).



4.3 Análisis de circuito equivalente y comparación de los cálculos de resistencias para ambos inhibidores

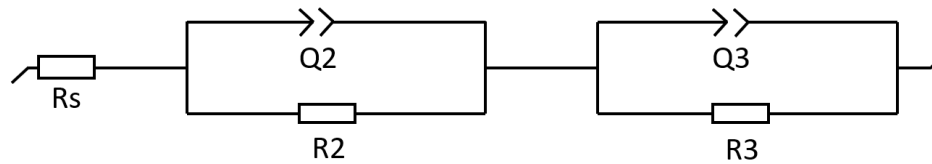
Mediante las curvas obtenidas a partir del análisis de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) se procedió a realizar un análisis matemático a través del circuito equivalente. El objetivo es ajustar los resultados a un circuito equivalente que represente de mejor manera las curvas para cada volumen añadido (0, 5, 10, 25, 50, 100 y 200 μL) y para cada inhibidor de Chañar (con metanol y acetato de etilo). Se obtuvo un circuito que representó de mejor manera el análisis electroanalítico para ambos inhibidores y

corresponde al siguiente:

$$Z = R_s + \frac{1}{\frac{1}{R_2} + Q_2} + \frac{1}{\frac{1}{R_3} + Q_3} \quad (4.1)$$

En este circuito seleccionado la impedancia equivalente del sistema (Z) está constituido por tres resistencias, la primera de ellas se denomina la resistencia a la solución (R_s), en tanto para las resistencias restantes representan la resistencia para capa individual de la transferencia de carga (R_2) y la resistencia de la película de óxidos (R_3), asociados a sus capacitancias referidas por elementos de fase constante (Q_2 y Q_3). La representación gráfica de este circuito equivalente se puede observar en la Figura 4.6.

Figura 4.6 Representación del circuito equivalente para el acero AISI 1020 en presencia de inhibidores de Chañar.



Creación propia, 2023.

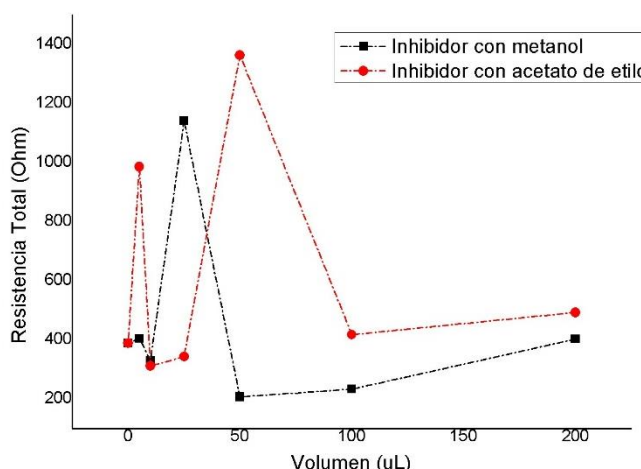
Seleccionado el circuito equivalente (ver Ec. 4.1 y Figura 4.6) y aplicado para cada inhibidor de Chañar y volúmenes añadidos, se pudo obtener los valores de R_2 y R_3 , en donde la suma de ambas resistencias permitió obtener las resistencias totales (R_T) para cada caso, lo que permitió realizar el cálculo la eficiencia de inhibición en porcentaje mediante la Ec. 3.1 (los valores de R_2 , R_3 , R_T y η_{inh} se encuentran adjuntos en el Anexo C).

En función a los datos obtenidos con el análisis matemático aplicado al análisis EIS, se logró evaluar las resistencias totales de cada inhibidor de Chañar y para cada volumen estudiada, que se puede observar en la Figura 4.7.

A través de la Figura 4.7 se puede evaluar la resistencia a la corrosión mediante la resistencia total (R_T), donde se puede observar que los dos inhibidores de Chañar tienen la misma resistencia total sin la presencia de inhibidor (0 μ L), sin embargo, a partir de la

adición de los distintos volúmenes de inhibidor a la solución agresiva se puede apreciar las diferentes tendencias de los resultados para ambas gráficas. Para ambos extractos se alcanzaron resistencias totales menores y mayores respecto a los obtenidos en ausencia de inhibidor, por lo tanto ninguna de los volúmenes utilizados tuvieron un crecimiento ascendente para la resistencia a la corrosión. En el caso del inhibidor de Chañar con metanol la resistencia total mayor alcanzada fue con un volumen de 25 μL , en tanto para el inhibidor de Chañar con acetato de etilo fue con un volumen de 50 μL .

Figura 4.7 Resistencia totales vs volumen de ambos inhibidores de Chañar para el acero AISI 1020 en soluciones 1 M de NaCl.

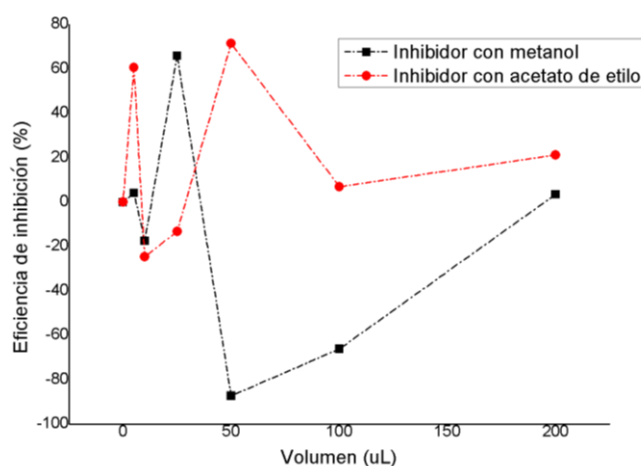


A partir de las resistencias totales de cada volumen añadido (0, 5, 10, 25, 50, 100 y 200 μL) se puede obtener los porcentajes de eficiencia de inhibición para cada extracto acuoso de Chañar, con el objetivo de determinar la efectividad frente a la corrosión del acero al carbono inmerso en una solución salina (1 M de NaCl) con los distintos volúmenes, así mismo fue de suma importancia el análisis sin la presencia del inhibidor, para la obtención numérica de la eficiencia. La Figura 4.8 representa lo anteriormente mencionado.

A través de la Figura 4.8 se puede mencionar que para ambos inhibidores de Chañar se obtuvieron distintos porcentajes de eficiencia de inhibición con la concordancia de volúmenes añadidos. Por ejemplo, para el volumen de 50 μL de inhibidor de Chañar con metanol tuvo una eficiencia de -87%, para el mismo volumen, pero con inhibidor de Chañar con acetato de etilo tuvo una eficiencia de 72%. Por lo tanto, para los dos

inhibidores se presentaron porcentajes negativos y porcentajes muy elevados. En el caso del inhibidor con metanol la eficiencia más baja fue de -87% (para 50 μL) y la más alta fue de 66% (para 25 μL), y para el inhibidor con acetato de etilo la eficiencia más baja fue de -25% (para 10 μL) y la más alta fue de 72% (para 50 μL). Por ende, según el tipo de inhibidor de Chañar y el volumen utilizado, las eficiencias de corrosión negativas explicarían que el extracto favorecerá la corrosión o la oxidación del acero.

Figura 4.8 Eficiencia de inhibición de las resistencias totales vs volumen de ambos inhibidores de Chañar para el acero AISI 1020 en soluciones 1 M de NaCl.



4.4 Análisis tasas de corrosión

Mediante las ecuaciones 3.2 y 3.3 se obtuvieron los valores presentados en la Tabla 4.1 y Tabla 4.2. Los valores de resistencia total (RT) obtenidos desde el circuito equivalente para los distintos volúmenes (0, 5, 10, 25, 50, 100 y 200 μL) y para los distintos solventes (metanol y acetato de etilo), junto a las constantes de Tafel anódica y catódica permitieron el cálculo de la intensidad de corriente, donde las variables de resistencia total e intensidad de corriente son inversamente proporcionales, por lo que era de esperar valores bajos en la intensidad de corriente en ambos casos.

En el caso de la tasa de corrosión para ambos casos se presentó la misma pérdida de material por deterioro producto de la corrosión sin la presencia de inhibidor. Para el inhibidor de Chañar con metanol (ver Tabla 4.1) el volumen que tuvo una menor pérdida de material fue de 25 μL , por el contrario, un volumen de 50 μL tuvo una mayor velocidad de deterioro. Por otro lado, para el inhibidor de Chañar con acetato de etilo (ver Tabla 4.2)

la menor y mayor tasa de corrosión se obtuvo con un volumen de 50 μL y 10 μL respectivamente. Se puede analizar que para la situación de un volumen de 50 μL se logró una mayor o una menor pérdida de acero al carbono AISI 1020 dependiendo del tipo de inhibidor que se utilizó. También que para volúmenes altos (100 y 200 μL) la velocidad con que se deteriora la muestra es cercana o mayor a la tasa de corrosión con nula presencia de inhibidor para ambos inhibidores.

Tabla 4.1 Resultados de intensidad de corriente y tasa de corrosión para acero AISI 1020 en soluciones 1 M de NaCl con y sin presencia de inhibidor de Chañar con metanol.

Volumen (μL)	RT (Ohm)	Icorr (A)	Vcorr (mmpy)
0	388,453	5,158E-05	1,519
5	405,061	4,947E-05	1,457
10	330,633	6,060E-05	1,785
25	1141,600	1,755E-05	0,517
50	207,462	9,658E-05	2,845
100	233,840	8,569E-05	2,524
200	402,800	4,975E-05	1,465

Tabla 4.2 Resultados de intensidad de corriente y tasa de corrosión para acero AISI 1020 en soluciones 1 M de NaCl con y sin presencia de inhibidor de Chañar con acetato de etilo.

Volumen (μL)	RT (Ohm)	Icorr (A)	Vcorr (mmpy)
0	388,453	5,158E-05	1,519
5	986,518	2,031E-05	0,598
10	311,570	6,431E-05	1,894
25	343,158	5,839E-05	1,720
50	1364,200	1,469E-05	0,433
100	417,646	4,798E-05	1,413
200	492,910	4,065E-05	1,197

4.5 Análisis morfológico

El análisis morfológico fue realizado para tres muestras de electrodos de trabajo de acero al carbono AISI 1020 y realizado utilizando el equipo de microscopia electrónica de barrido (MEB) para el registro de dos imágenes correspondientes a BSD y SE, donde cada

muestra se analizó a una magnitud de 100x y 500x. Además, se utilizó la técnica de espectroscopia de rayos X de energía dispersa (EDS) para una magnitud de 500x en orden a evaluar la composición elemental de los productos de la corrosión. Para el análisis morfológico el electrodo de trabajo fue sometido a un proceso de oxidación 2 h.

La Figura 4.9 y la Figura 4.10 corresponde a la muestra del electrodo de acero al carbono AISI 1020 después estar inmerso en una solución salina (1 M de NaCl) sin la presencia de extracto acuoso de Chañar. Estas figuras se diferencian solamente en la magnitud utilizada, por lo tanto, se trata de la misma pieza de acero al carbono por ello se analizarán de la misma manera. A partir de la técnica MEB se observó con una magnitud de 100x zonas de corrosión y otras zonas donde se pudo observar el electrodo de acero pulido previamente. Con una magnitud de 500x se logró observar de mejor manera la corrosión que se formó de manera de globular. La técnica EDS (ver Figura 4.11) indicó la composición elemental encontrada en la muestra donde los elementos más presentes fueron el hierro y el oxígeno así como la presencia de cloro, explicando así la formación de óxido de hierro, en adición a posibles sales de cloruros tal como el NaCl. En la Figura D.1 del Anexo D se puede observar los porcentajes en pesos de los distintos elementos encontrados de la técnica EDS.

Figura 4.9 Imágenes MEB con una magnitud de 100x de la pieza de acero AISI 1020 inmersa en solución de 1 M de NaCl sin la presencia de inhibidor de Chañar. Imagen BSD (a) e imagen SE (b).

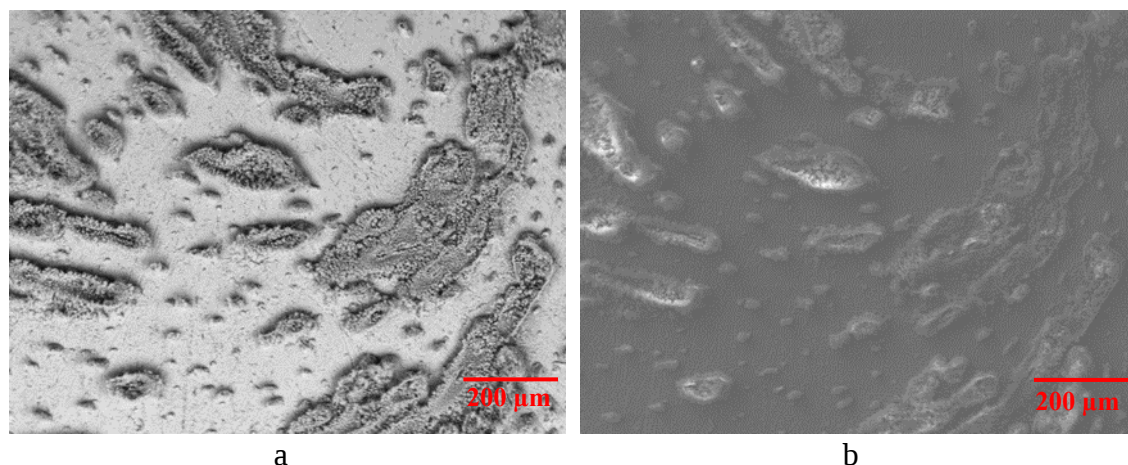


Figura 4.10 Imágenes MEB con una magnitud de 500x de la pieza de acero AISI 1020 inmersa en solución de 1 M de NaCl sin la presencia de inhibidor de Chañar. Imagen BSD (a) e imagen SE (b).

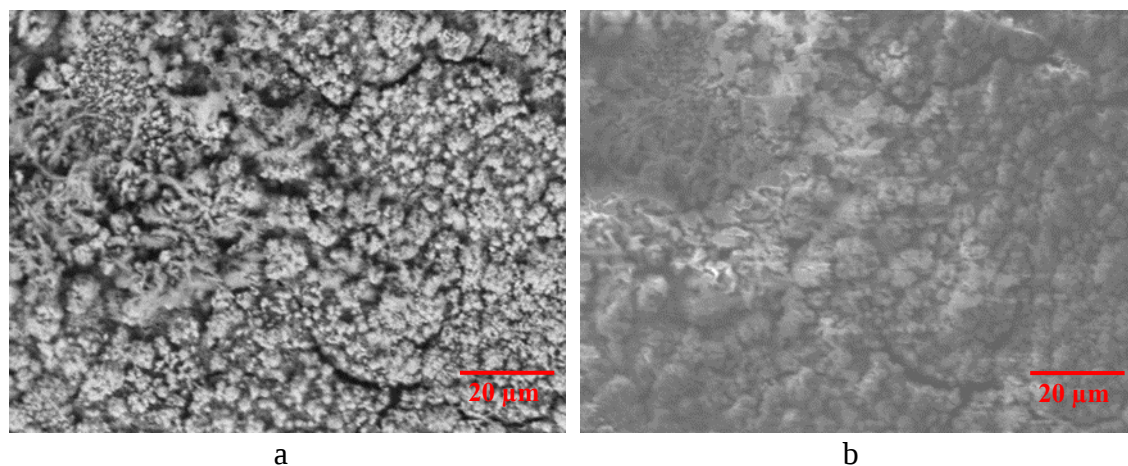
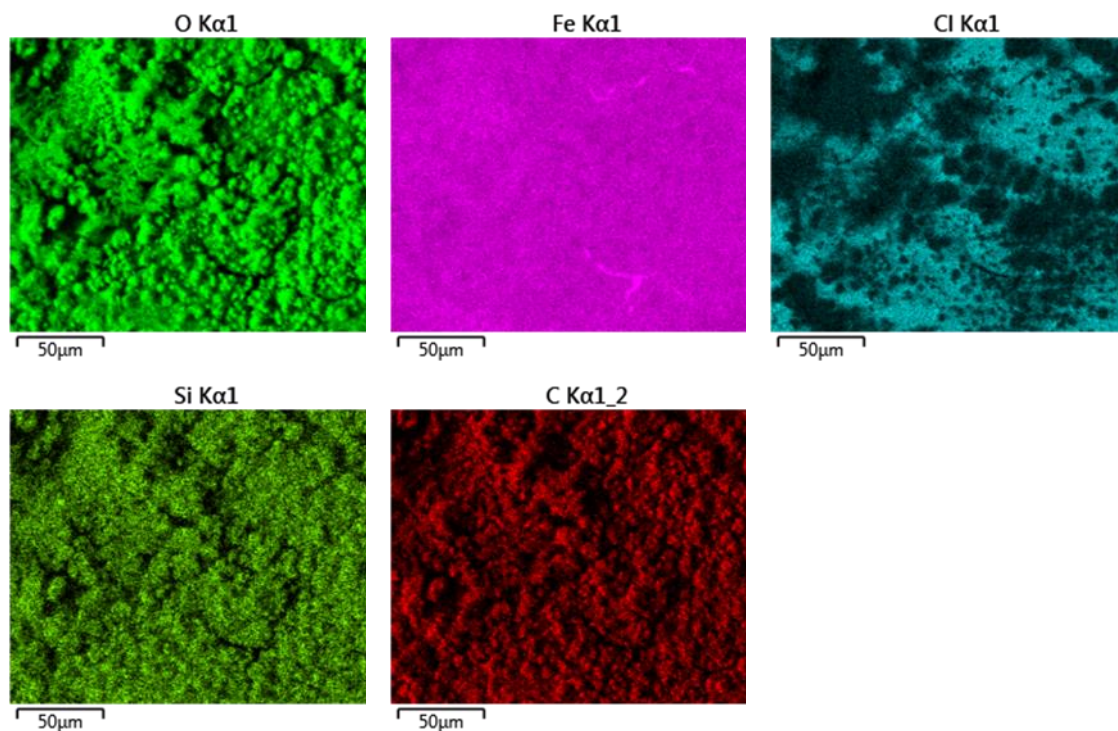


Figura 4.11 Imágenes EDS con una magnitud de 500x de la pieza de acero AISI 1020 inmersa en solución de 1 M de NaCl, sin la presencia de inhibidor de Chañar.



En la Figura 4.12 y la Figura 4.13 se presentan imágenes de la muestra de electrodo de acero al carbono AISI 1020 después estar inmerso en una solución salina (1 M de NaCl) y 100 μ L de inhibidor de Chañar proveniente de la extracción con metanol. Los resultados muestran la formación de óxido en forma de “escamas”, también se pudo observar una

corrosión llamada pitting que hace referencia a pequeños hoyos o agujeros en el metal así como una corrosión generalizada. Estos resultados están acordes a los resultados electroquímicos mostrando una baja protección del inhibidor. Por otro parte la Figura 4.14 muestra la composición elemental de la superficie de la muestra, los elementos más presentes fueron el hierro, el carbono y el oxígeno, principalmente ubicados en estos espacios generando así la creación del fenómeno de corrosión. Los demás elementos forman parte de la solución salina y también forman parte del acero al carbono. En la Figura D.2 del Anexo D se puede observar los porcentajes en pesos de los distintos elementos encontrados de la técnica EDS.

Figura 4.12 Imágenes MEB con una magnitud de 100x de la pieza de acero AISI 1020 inmersa en solución de 1 M de NaCl con 100 μ L de inhibidor de Chañar con metanol. Imagen BSD (a) e imagen SE (b).

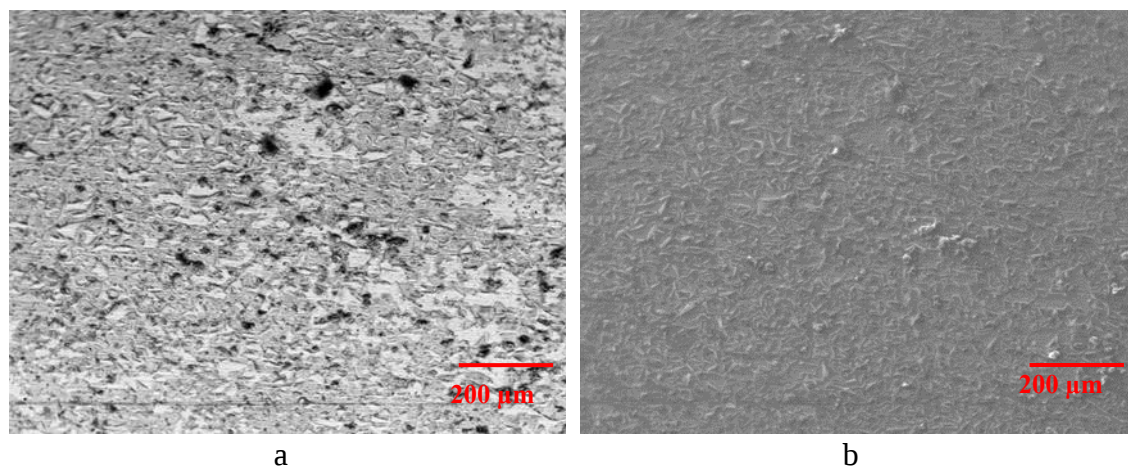


Figura 4.13 Imágenes MEB con una magnitud de 500x de la pieza de acero AISI 1020 inmersa en solución de 1 M de NaCl con 100 μ L de inhibidor de Chañar con metanol. Imagen BSD (a) e imagen SE (b).

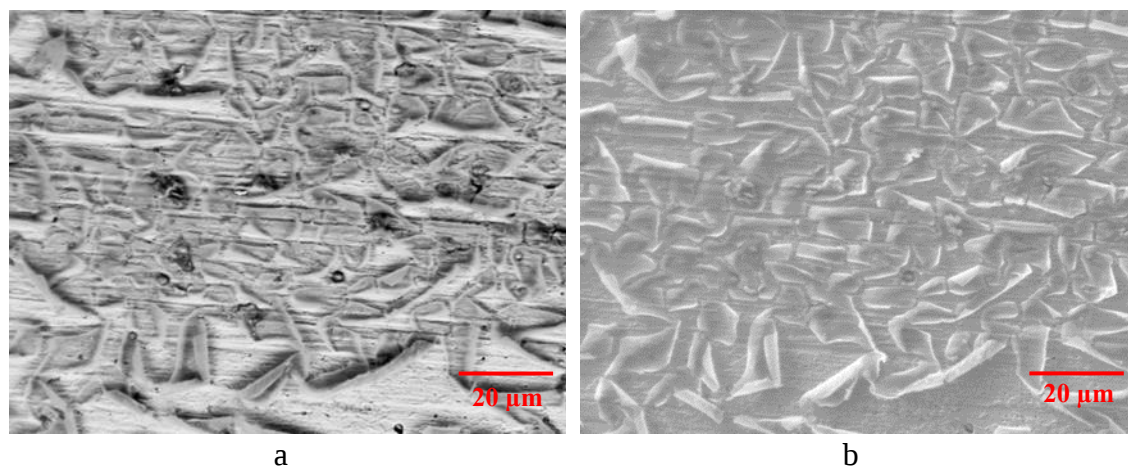
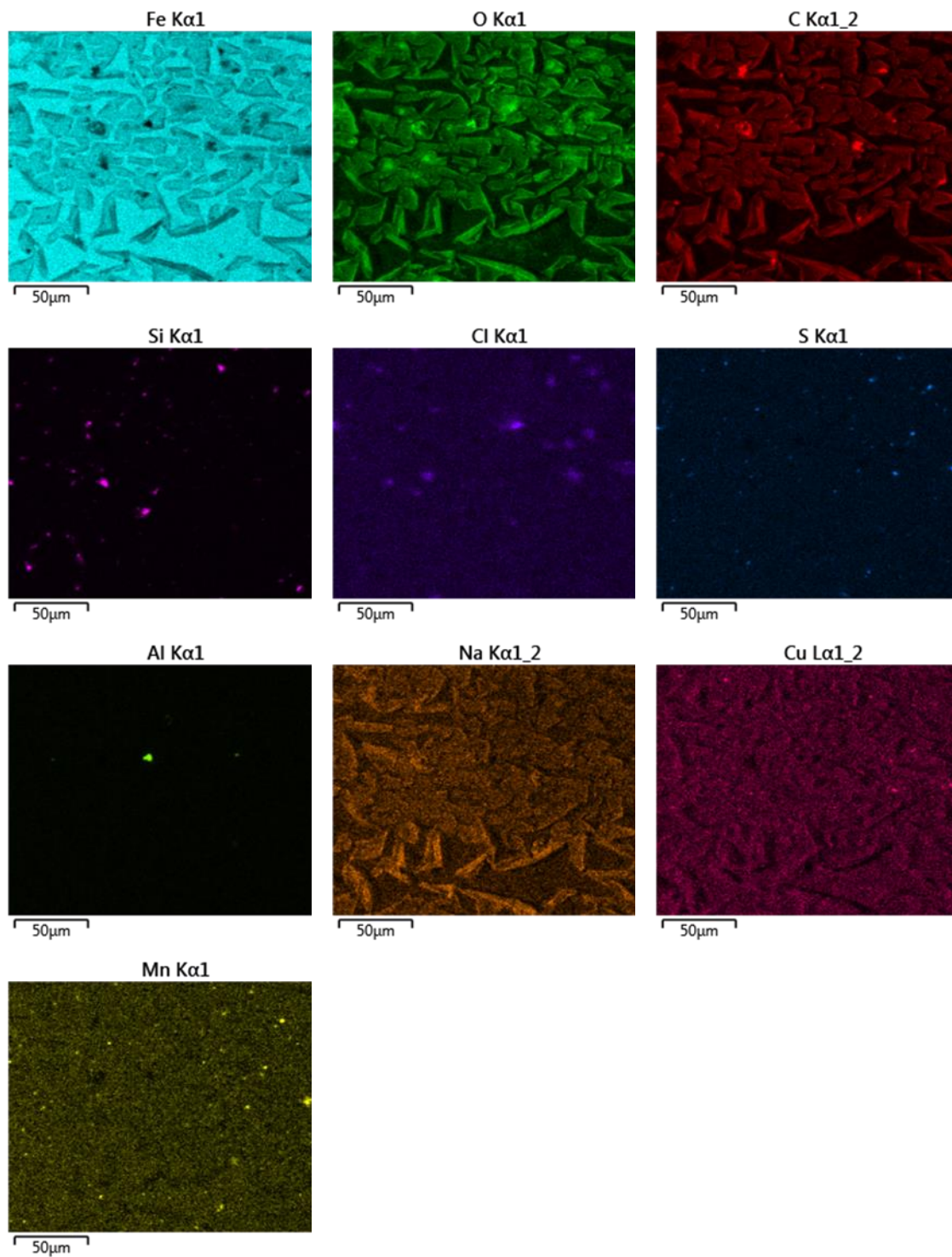


Figura 4.14 Imágenes EDS con una magnitud de 500x de la pieza de acero AISI 1020 inmersa en solución de 1 M de NaCl con 100 μ L de inhibidor de Chañar con metanol.



En la Figura 4.15 y la Figura 4.16 correspondiente a la muestra del electrodo de acero

al carbono AISI 1020 después estar inmerso en una solución salina (1 M de NaCl) con 100 μ L de inhibidor de corrosión de Chañar proveniente del solvente acetato de etilo, se pudo observar una corrosión uniforme, es decir en la totalidad de la superficie de la muestra. Una inspección más detallada con una magnitud de 500x reveló que la corrosión presentó productos de oxidación con forma globular.

Figura 4.15 Imágenes MEB con una magnitud de 100x de la pieza de acero AISI 1020 inmersa en solución de 1 M de NaCl con 100 μ L de inhibidor de Chañar con acetato de etilo. Imagen BSD (a) e imagen SE (b).

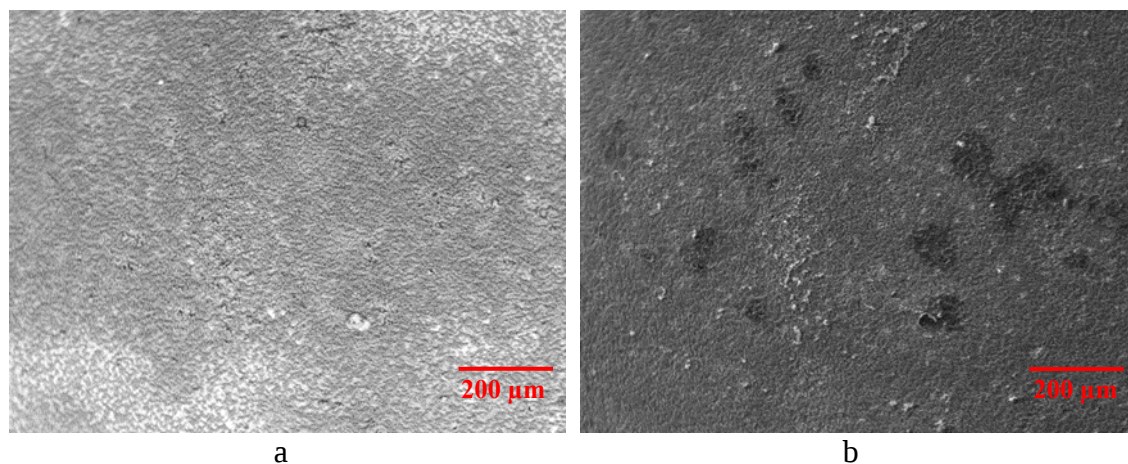
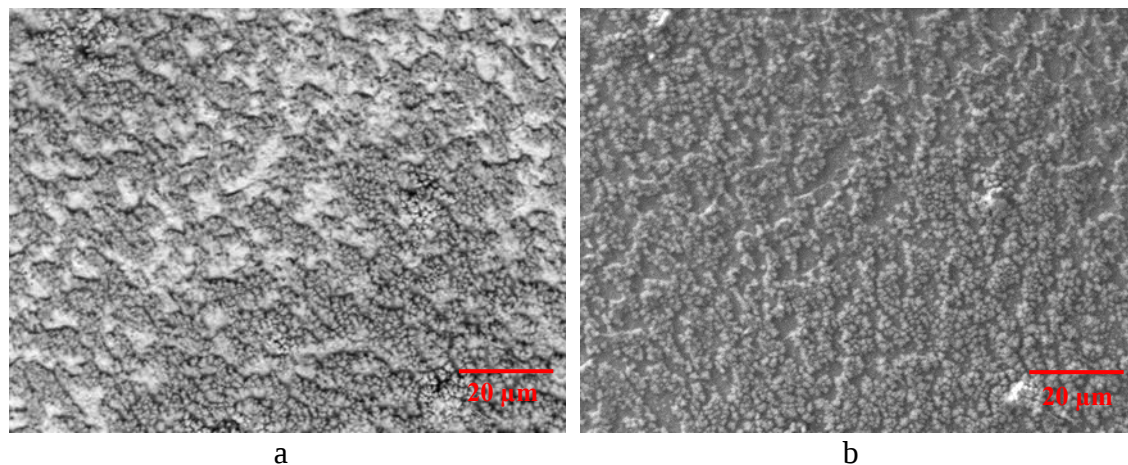


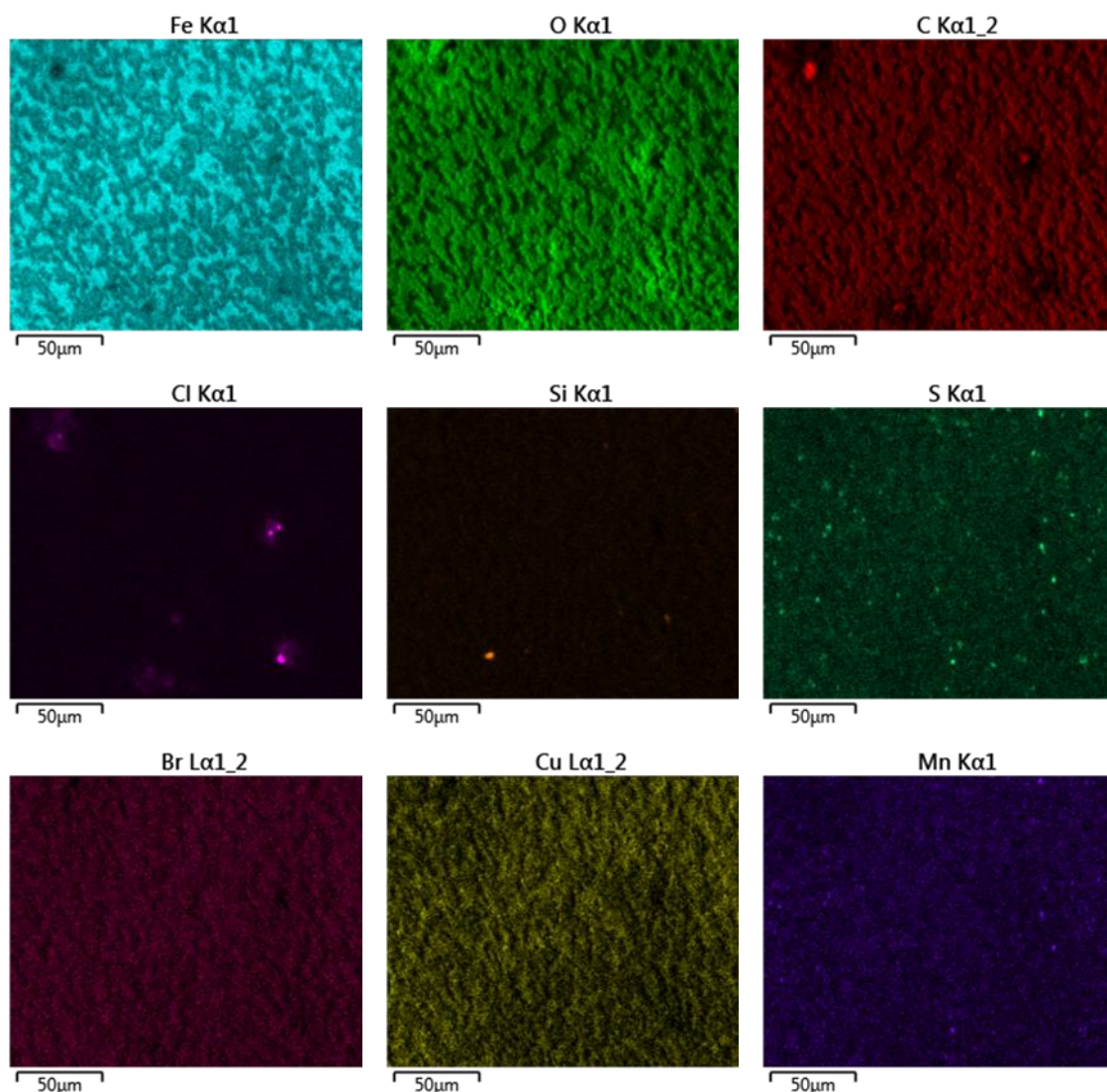
Figura 4.16 Imágenes MEB con una magnitud de 500x de la pieza de acero AISI 1020 inmersa en solución de 1 M de NaCl con 100 μ L de inhibidor de Chañar con acetato de etilo. Imagen BSD (a) e imagen SE (b).



La Figura 4.17, correspondiente a la técnica EDS permitió observar de manera cualitativa los elementos presentes en la muestra, los elementos hierro, carbono (principales en la

formación del acero AISI 1020) y oxígeno, formando así el fenómeno de corrosión. Los demás elementos forman parte del acero al carbono y de la solución salina. En la Figura D.3 del Anexo D se puede observar los porcentajes en pesos de los distintos elementos encontrados de la técnica EDS. Estos resultados, también revelan una baja protección del acero en presencia del inhibidor.

Figura 4.17 Imágenes EDS con una magnitud de 500x de la pieza de acero AISI 1020 inmersa en solución de 1 M de NaCl con 100 μ L de inhibidor de Chañar con acetato de etilo.



Por lo tanto, dependiendo del tipo de inhibidor que se esté utilizando, si es proveniente del metanol o acetato de etilo el fenómeno de corrosión se diferenciara en la forma que se

presentan los productos de corrosión así como el tipo de corrosión, tal como corrosión localizada por picaduras (con metanol) y corrosión generalizada (con acetato de etilo). Adicionalmente, se observó que con la adición de 100 μL de inhibidor de Chañar con metanol la corrosión se presentó de manera de “escamas”, en cambio, para el mismo volumen de inhibidor de Chañar con acetato de etilo el deterioro se presentó de manera globular.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES

En el presente estudio se investigó si las hojas del árbol o arbusto Chañar ubicados en la comuna de Copiapó, Chile, se puede reconocer como inhibidor de corrosión y así evitar el deterioro en un acero al carbono inmerso en una solución salina 1 M NaCl.

El extracto acuoso de las hojas del Chañar se obtuvo mediante el extractor Soxhlet utilizando solventes metanol y acetato de etilo, los cuales fueron los seleccionados en base a su polaridad para extraer los fitoquímicos importantes de las hojas del Chañar. El metanol tiene una polaridad alta por lo que extrajo todos los componentes polares de las hojas y el acetato de etilo tiene una polaridad media por lo que extrajo componentes tanto apolares como polares de la hoja de Chañar.

La tasa de corrosión para el caso del extracto acuoso de Chañar proveniente del metanol indicó que la mayor disminución de pérdida de material que se pudo alcanzar fue de un 65,97%. En tanto para el caso del inhibidor de Chañar con acetato de etilo fue posible disminuir la tasa de corrosión en un 71,53%. No obstante, el promedio obtenido para el caso de inhibidor de Chañar proveniente del metanol indicó un aumento en un 16,20% de la pérdida de material en comparación a los resultados en ausencia del inhibidor. Para el caso del extracto acuoso de Chañar proveniente del acetato de etilo hubo una disminución en promedio de la tasa de corrosión de 20,41%. Por lo tanto, el extracto acuoso de Chañar para ambos casos indicó que la utilización de estos favorecía o disminuían en muy pequeña cantidad el fenómeno de corrosión. Esta variabilidad puede ser atribuida a la variabilidad en los compuestos activos presentes en los extractos desde las hojas del Chañar.

Los patrones morfológicos del acero al carbono AISI 1020 en ausencia del extracto de Chañar indicó que la corrosión del electrodo no ocurrió de manera total en su superficie, en tanto con la presencia de 100 μ L de extracto acuoso de Chañar con acetato de etilo presento el deterioro total de la superficie del acero al carbono de manera globular y generalizada, mientras tanto la tasa de corrosión indico que solo disminuyó un 6,89%. Para el caso de 100 μ L de extracto acuoso de Chañar con metanol también presento corrosión en la totalidad del área expuesta del acero al carbono en manera de escamas, en tanto la tasa de corrosión reflejo un aumento en la corrosión de 66,38% por lo que este

volumen favoreció la corrosión con presencia de picaduras en el acero.

Después de analizar el extracto acuoso de las hojas del árbol o arbusto Chañar, situado en la comuna de Copiapó, Chile, en condiciones de soluciones salinas de NaCl con una molaridad de 1 M, se puede concluir que no es adecuado como inhibidor de corrosión para el acero al carbono AISI 1020. En algunos casos, incluso favoreció el proceso de corrosión.

Sugerencias para futuros trabajos

Extraer hojas de Chañar provenientes de otras comunas de Chile con diferentes condiciones climáticas de Copiapó, Chile, con el objetivo de esclarecer si con un distinto clima los fitoquímicos extraídos desde la hoja tienen un mayor potencial de ser inhibidor de corrosión.

Trabajar con el extracto acuoso de Chañar en sólido, es decir al tener el extracto en estado líquido hacer un procedimiento necesario para transformar de estado físico el producto de interés, con el objetivo de que cuando se ingrese el inhibidor de Chañar junto con la solución a la celda exista una mezcla homogénea y atribuya a la formación de la capa protectora en el electrodo de acero al carbono AISI 1020.

Utilizar medios ácidos, por ejemplo, H_2SO_4 o HCl en vez de medios neutros o alcalinos como en el caso que se utilizó NaCl , con el objetivo de comprobar si los inhibidores de corrosión verdes son más eficientes en un medio ácido.

REFERENCIAS

- Abdel-Gaber, A.M; Saadawy, M. *Inhibitive action of some plant extract on the corrosion of steel in acidic media*. Corros. Sci, 48: 2765-2779 (2006)
- Amparo, P. *Efecto de la corrosión en puentes viales chilenos*. Memoria, Santiago (2021)
- Alrefae, S; Rhee, K; Verma, C; Quraishi, MA; Ebonso, E. *Challenges and advantages of using plant extract as inhibitors in modern corrosion inhibition systems: Recent advancements*. Journal of molecular liquids, (2021)
- Baly, ECC; Heilbron, IM; Barker, WF. *Fotocatálisis. Parte I. "La síntesis de formaldehído y carbohidratos a partir de dióxido de carbono y agua*. J. Chem. Soc. Trans, 1025-1035 (1921)
- Bardo, AJ; Faulkner, LR. *Métodos electroquímicos. Fundamentos y Aplicaciones*. 2da Ed. Wiley, Nueva York (2001)
- Bezerra de Barros, I; Abud Kappel, MA; Moraes dos santos, P; Florencio va Veiga Junior, V; D'Elia, E; Napoleao, I. *The inhibitory action of Bauhinia purpurea extracts on the corrosión of carbon Steel in sulfuric acid médium*. Instituto Politécnico. Universidade do Estadi do Rio de Janeiro (2015)
- Callister, W. *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. Editorial UPC, (2003)
- Cardeña, R; Cercado, B; Buitrón, G. Celda de electrolisis microbiana para la producción de biohidrógeno. Biohidrógeno (Segundo Edición), 159-185 (2019)
- Castro, I. *El bosque de la Pampa del Tamarugal y la industria salitrera: el problema de la deforestación, los proyectos para su manejo sustentable y el debate político*. Scr, 24 (1829-1941)
- Cendoya, MA; Micca, M; Bogino, SM. *Dinámica de crecimiento de Geoffroea Decorticans y Parkinsonia praecox y su respuesta al clima en ambientes áridos y semiáridos de Argentina*. Bosque, 141-150 (2021)
- Chang, BY; Park, SM. *Electrochemical impedance spectroscopy*. Annual Review of Analytical Chemistry, 207-229 (2010)

- Chen, D; Howe, K; Dallman, J; Bruce, C. *Corrosion of aluminium in the aqueous chemical environment of loss-of-coolant accident at a nuclear power plant*. Corros. Sci, 50:1046-1057, (2008)
- Contreras, R; Porcile, V; Aguayo, F. *Genetic diversity of Geoffroea Decorticans, a native woody leguminous species from Atacama Desert in Chile*. Bosque, 39(2): 321-332. DOI: 10.4067/S0717-92002018000200321, (2018)
- Contreras, R; Porcile, V; Aguayo, F. *Microsatellites reveal a high genetic differentiation among native Geoffroea Decorticans populations in Chilean Atacama Desert*. Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica, 54(2):225-240. DOI: 10.31055/1851.2372.v54 (2019)
- Cotabarren, J; Broitman, DJ; Quiroga, E. *El primer inhibidor de tripsina termoestable de semillas de Geoffroea Decorticans*. Un nuevo fármaco natural con potencial aplicación en biomedicina. Int J Biol Macromol, 148869-148879 (2020)
- Díaz, A; Vera, R; Chacón, A. *Evaluation of endemic Chilean plant-based Chañar extract (Geoffroea decorticans) as an inhibitor of corrosion for A36 steel under a saline environment*. Materials and Corrosion, (2020)
- Echeverría, J; Paniagua-Zambrana, NY; Bussmann, RW. *Geoffroea decorticans (Gillies ex Hook. & Arn.)*. Burkart FABACEA, (2020)
- Elgrishi, N; Rountree, KJ; McCarthy, BD. *A Practical Beginner's Guide to Cyclic Voltammetry*. Diario de química, (2018)
- Eynard, C; Galetto, L. *Pollination ecology of Geoffroea decorticans (Fabaceae) in central Argentine dry forest* J. Arid. Environ. 51: 79-88. Doi: 10.1006/jare.2001.0923, (2002)
- Fernandez, L; Shirley, P; Vidales, M. *Evaluación de la capacidad inhibidora de la corrosión de los extractos del árbol de Neem (Azadirachta Indica) en medio salino*. Cartagena de Indias, (2013)
- Figueredo F; Vera, R; Molinari, A. *Evaluación de extractos de Eulychnia acida y Echinopsis chiloensis (Cactaceae) para inhibir la corrosión del acero al carbono en solución de HCl*. Wiley Online Library, (2019)

- Fuentes, C. *Estudio exploratorio del comportamiento electroquímico de sulfuros de cobre en medio acuoso*. Informe de memoria de título, Universidad de Concepción 19 (2017)
- Giménez, AM. *Anatomía comparada de leño y corteza de Geoffroea striata y Geoffroea decorticans*. Madera y Bosques, 55-68 (2004)
- Giménez, AM. *Anatomía de madera, corteza y anillos de crecimiento de Geoffroea decorticans*. (Gill. Ex Hook, & Arn.) Burk. Quebracho 17(1.2):16-30, (2009)
- Giménez, AM; Hernández, P; Ríos, N; Calatayu, F. *Crecimiento de árboles individuales de Geoffroea decorticans Burkart, en un bosque del Chaco semiárido, Argentina*. Madera y Bosques, 19(1): 37-51. Doi: 10.21829/myb.2013.191345, (2013)
- Harborne, JB. *Método Fitokimia: Penuntun Cara Menganalisis Tumbuhan Terbitan Kedua*. Penerbit ITB, Bandung (1987)
- Haryono, G; Sugiarto, B; Farid, H; Tanoto, Y. *Inhibidor Korosi de Ekstrak Bahan Alam Sebagai. Seminario Prosiding Nasional Teknik Kimia “Kejuangan”*. Yogyakarta, (2010)
- Huu, N. *The inhibition of copper corrosion in aqueous environment heterocyclic compounds. Tesis de doctorado*. Universidad Tecnológica de Queensland, (2004)
- Ipohorski, M & Bozzano, P. *Microscopía electrónica de barrido en la caracterización de materiales*. Ciencia e investigación, 44-53 (2013)
- Jiménez-Aspee, F., Theoduloz, C., Soriano, M., Ugalde-Arbizu, M., Alberto, M., Zampini, I., Isla, M., et al. (2017). The Native Fruit Geoffroea decorticans from Arid Northern Chile: Phenolic Composition, Antioxidant Activities and In Vitro Inhibition of Pro-Inflammatory and Metabolic Syndrome-Associated Enzymes. *Molecules*, 22(9), (1565).
- Jones, DA. *Principios y prevención de Corrosión*. Editorial Macmillan. Nueva York (1992)
- Kalpakjian, S; Schmid, S; Figueroa, U. *Manufactura, ingeniería y tecnología*. s.l.: Editorial Pearson Educación de México, 2002
- Lasia, A. Electrochemical impedance spectroscopy and its applications. In Modern aspects of electrochemistry, 143-248 (2002)

- Li, D; Zhang, P; Guo, X; Zhao, X; Xu, Y. *The inhibition of mild steel corrosion in 0.5 M H₂SO₄ solution by radish leaf extract*. Royal society of chemistry, (2019)
- Macdonald, JR; Johnson, WB. *Fundamentals of impedance spectroscopy*. Barsoukov, E; Macdonald, JR (editors). *Impedance Spectroscopy. Theory, experiment and applications*. 2a Edición, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc, 1-26 (2005)
- Martínez, L. *Caracterización y antecedentes para el manejo de Chañar (Geoffroea decorticans (Gill. Ex Hook et Arn)) en la zona de Copiapó*. Tesis Facultad de Ciencias Agrarias, Escuela de Ciencias Forestales, Santiago, Chile, 100 (1989)
- Mora, L. *Determinación del comportamiento corrosivo del aluminio con recubrimientos con aditivos polifenoles extraídos de Pino Radiata en ambientes marinos*. Memoria de título. 31 (2018)
- Namboodiri, N. Tafel extrapolation method. LinkedIn <https://www.linkedin.com/pulse/tafel-extrapolation-method-neeraj-k-namboodiri>, (2020)
- Núñez, L; Mcrostitie, V; Cartejena, I. *Consideraciones sobre la recolección vegetal y la horticultura durante el formativo temprano en el sureste de la cuenca de atacama*. Darwiniana, 27 (1) págs. 56-75 (2009)
- Redha, A. *Flavonoid: Struktur, Sifat Antioksidatif Dan Peranannya Dalam Sistem Biologis*. 2013
- Restrepo, C; Simonoff, J; Zimmerman, R. *Causes cost consequences, and risk implications of accidents in US hazardous liquid pipeline infrastructure*. Int. J. Crit. Infrastruct. Prot, (2) 38-50 (2009)
- Rondon, C. *Manual de Armaduras de Refuerzo para Hormigón*. 290 (2005)
- Santander, F. *Estudio de la capacidad inhibidora de la corrosión de extractos de Allium Cepa en medio ácido por métodos electroquímicos*. Informe de memoria de título, (2018)
- Schreiner, M; Huyskens-Keil, S. *Fitoquímicos en frutas y verduras: promoción de la salud y elicitors poscosecha*. Crit. Rev. Plant Sci., 25 267-278 (2006)
- Silva, R; López de Ruiz, R. *Estudio fitoquímico de flores de Geoffroea decorticans (Gill. Ex Hook. et Arm.) Burk, Leguminosae (Fabaceae)*. (2004)

- Soliz, A; Cáceres, L. *Corrosion Behavior of Carbon Steel in LiBr in Comparison to NaCl Solutions under Controlled Hydrodynamic Conditions*. International Journal of Electrochemical Science (2015)
- Tejeda, L; Meza, P; Altamiranda, E; Berrocal, MJ. *Uso de extractos de plantas como inhibidores*. (2014)
- Ugalde, PC; McRostie; V; Gayo, EM. *13.000 años de uso sociocultural de las plantas en el Desierto de Atacama del norte de Chile*. Veg Hist Archaeobot. 30 págs. 213-230 (2021)
- Uhlig, HH; Revie, RW. *Corrosion and Corrosion Control: An introduction to Corrosion Science and Engineering*. New Jersey: John Wiley & Sons, INC, 2008
- Vázquez, JL. *Empleo de la Técnica de Espectroscopía de Impedancias Electroquímicas para la Caracterización de Biomateriales. Aplicación a una Aleación Biomédica de Co-Cr-Mo*. Tesis de Máster, (2007)
- Zakeri, A; Bahmani, E; Adhdam, A. *Plant extracts as sustainable and green corrosion inhibitors for protection of ferrous metals in corrosive media: A mini review*. Corrosion communications, 28 (2022)
- Zhu, S; Sun, X; Wang, Y; Zhao, N; Sha, J. *Equivalent circuit model recognition of electrochemical impedance spectroscopy via machine learning*. School of Materials Science and Engineering and Tianjin Key Laboratory of Composites and Functional Materials, 1-2 (2019)

ANEXOS

Anexo A. Tablas mediciones de la técnica OCV

Tabla A.1 Resultados del potencial medidos del tiempo inicial y del tiempo final de la técnica OCV del inhibidor con metanol para los distintos volúmenes de 0, 5, 10, 25, 50, 100 y 200 μL .

Volumen μL	Potencial inicial (V)	Potencial final (V)
0	-0,42	-0,51
5	-0,44	-0,55
10	0,42	0,51
25	-0,42	-0,51
50	-0,44	-0,56
100	-0,42	-0,51
200	-0,43	-0,50

Tabla A.2 Resultados del potencial medidos del tiempo inicial y del tiempo final de la técnica OCV, del inhibidor con acetato de etilo para los distintos volúmenes de 0, 5, 10, 25, 50, 100 y 200 μL .

Volumen μL	Potencial inicial (V)	Potencial final (V)
0	-0,42	-0,51
5	-0,43	-0,51
10	-0,45	-0,55
25	-0,46	-0,52
50	-0,50	-0,49
100	-0,42	-0,47
200	-0,55	-0,46

Anexo B. Tablas mediciones de la técnica PEIS

Tabla B.1 Resultados de la R_s desde el diagrama de Nyquist para de ambos inhibidores a los distintos volúmenes de 0, 5, 10, 25, 50, 100 y 200 μL , cuando $-\text{Im}(Z)=0 \text{ Ohm}$.

Volumen μL	Inhibidor con metanol, R_s (Ohm)	Inhibidor con acetato de etilo, R_s (Ohm)
0	9,34	9,34
5	7,13	8,48
10	11,24	11,24
25	9,13	7,58
50	7,94	8,45
100	11,53	9,94
200	8,20	12,03

Anexo C. Tablas resistencias circuitos equivalentes

Tabla C.1 Resultados cálculos resistencia inhibidor con metanol volúmenes de 0, 5, 10, 25, 50, 100 y 200 μL .

Volumen μL	R2 (Ohm)	R3 (Ohm)	RT (Ohm)	η_{inh} (%)
0	385,400	3,053	388,453	
5	0,861	404,200	405,061	4,100
10	328,400	2,233	330,633	-17,488
25	266,200	875,400	1141,600	65,973
50	4,662	202,800	207,462	-87,241
100	222,400	11,440	233,840	-66,119
200	245,300	157,500	402,800	3,562
Promedio				-16,202

Tabla C.2 Resultados cálculos resistencia inhibidor con acetato de etilo a volúmenes de 0, 5, 10, 25, 50, 100 y 200 μL .

Volumen μL	R2 (Ohm)	R3 (Ohm)	RT (Ohm)	η_{inh} (%)
0	385,400	3,053	388	
5	2,518	984,000	987	60,624
10	288,500	23,070	312	-24,676
25	342,200	0,958	343	-13,200
50	441,700	922,500	1364	71,525
100	1,046	416,600	418	6,990
200	404,000	88,910	493	21,192
Promedio				20,409

Anexo D. Resultados EDS

Figura D.1 Espectro químico del análisis EDS para el acero al carbono AISI 1020 inmerso en 1 M de NaCl sin inhibidor de Chañar.

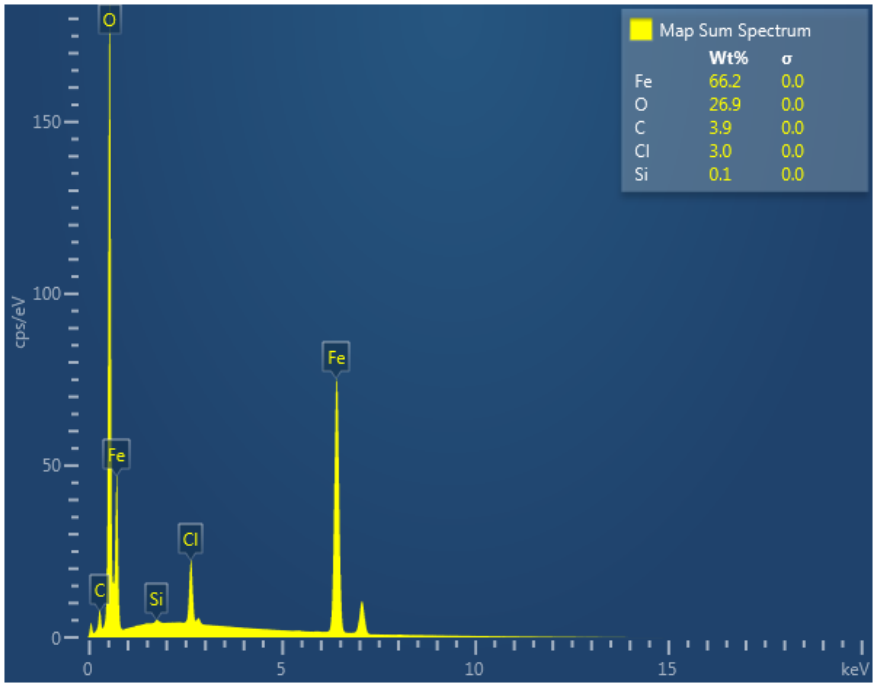


Figura D.2 Espectro químico del análisis EDS para el acero al carbono AISI 1020 inmerso en 1 M de NaCl con inhibidor de Chañar con metanol.

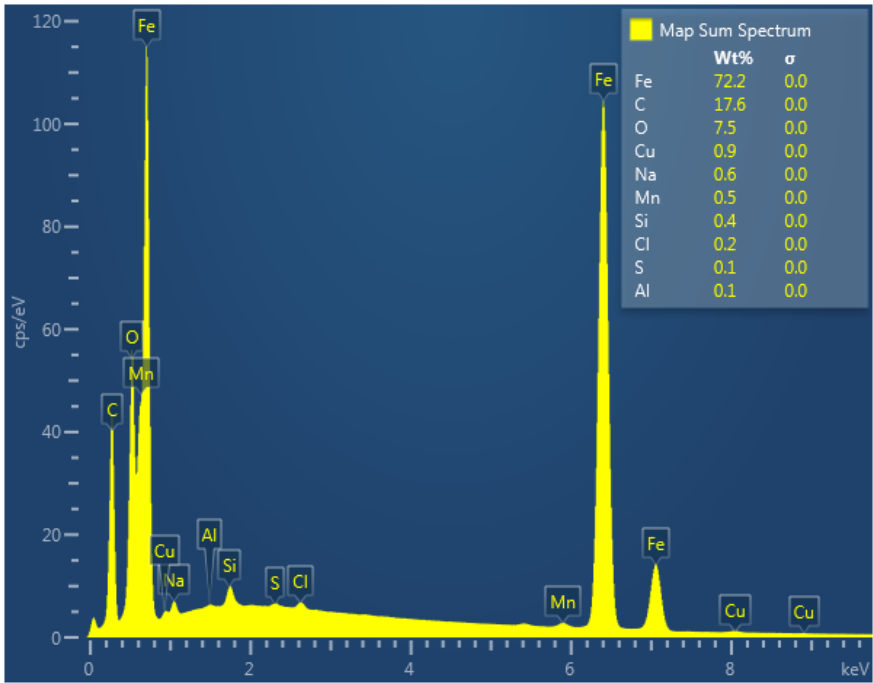


Figura D.3 Espectro químico del análisis EDS para el acero al carbono AISI 1020 inmerso en 1 M de NaCl con inhibidor de Chañar con acetato de etilo.

