

**EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD INHIBIDORA DE LA CORROSIÓN DE LOS
EXTRACTOS DEL ÁRBOL DE NEEM (*Azadirachta Indica*) EN MEDIO SALINO**



**SHIRLEY PAOLA LOAIZA FERNANDEZ
ALEXANDER VIDALES MANRIQUE**

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
CARTAGENA DE INDIAS, D. T. y C.**

2013

**EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD INHIBIDORA DE LA CORROSIÓN DE LOS
EXTRACTOS DEL ÁRBOL DE NEEM (*Azadirachta Indica*) EN MEDIO SALINO**

**SHIRLEY PAOLA LOAIZA FERNANDEZ
ALEXANDER VIDALES MANRIQUE**

Trabajo de grado para optar al título como Ingeniero Químico

**Director
Ing. Pedro Javier Meza Castellar**

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
CARTAGENA DE INDIAS, D. T. y C.
2013**

Nota de aceptación:

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de grado a Dios, por permitirme culminar exitosamente mi carrera y estar a un paso del tan anhelado sueño de graduarme como Ingeniera Química.

A mis padres, Patricia Fernández y Gelbert Loaiza gracias por su apoyo constante, por creer siempre en mis capacidades, por su amor, consejos y por ser mi inspiración para alcanzar mis metas sin desfallecer en el camino.

A mi hermana Laura Loaiza a quien admiro profundamente por ser ejemplo de dedicación y responsabilidad en el cumplimiento de los deberes universitarios, y por su entereza para afrontar los problemas y situaciones del día a día.

A mi hermano y amigo Andrés Loaiza, por ser una compañía constante aún en la distancia, gracias por haber fomentado en mí el deseo de superación y el anhelo de triunfo en la vida.

Por último agradezco a familiares y amigos que estuvieron siempre presentes en este camino que inicié hace cinco años en la Universidad de Cartagena.

Shirley Paola Loaiza Fernández

DEDICATORIA

Primero que todo sobre cielo y tierra gracias a Dios por ser mi guía durante estos años en la Universidad de Cartagena, brindarme sabiduría, paciencia, conformidad, amor sobre la carrera y a mí mismo, gracias padre celestial por ensalzarme de tu gloriosa presencia cuando más lo necesitaba, todo ha sido gracias a Ti. En tierra a mis padres que el mismo Dios cruzo en mi vida porque fueron mi fiel compañía; mi papa Jorge Enrique Vidales Rodríguez por nunca dejar de confiar en mi brindándome todos los ánimos que necesitaba para seguir adelante, sin olvidar que todas las bases que necesitaba para esta carrera te la debo a ti, nunca se me olvidara tu forma de enseñar las tablas de multiplicar que hasta ahora ha funcionado; a mi mama Jacqueline Manrique Moreno que siempre estuvo al pie de mis cosas, pendiente a todo lo que necesitaba, por tu esfuerzo de enseñarme cómo comportarme fuera y dentro de la casa, gracias a ti por enseñarme todos los valores éticos y el respeto que se le debe tener al Todo poderoso. A mis tías Anaminda Manrique, Ruby Manrique, Asunción Manrique que fueron unas madres más en mi vida, por su apoyo incondicional, gracias por sus oraciones; en especial a ti, Diva de Jesús Manrique Moreno, que a pesar de tu enfermedad fuiste luz de mis ojos, siempre me escuchabas cuando necesitaba que lo hicieran y sé que en tu interior orabas por mí. A mis hermanos Jorge Enrique y Jacqueline aunque no estuvieron físicamente durante mi vida universitaria sentí su apoyo incondicional desde cualquier rincón del mundo donde se encontraban, instruyéndome, hablándome brindándome los ánimos que siempre necesitaba. A mi primo Camilo Parra y mi tío Gabriel Manrique por su presencia siempre compartiendo nuestros conocimientos como futuros ingenieros y las muchas risas que teníamos al no estar de acuerdo uno con otro. A mi novia que Dios coloco en mi camino Keila Berrio por ser mi mano derecha, mi mejor amiga y fiel compañía, siempre dándome esas palabras de aliento que me levantaban el ánimo, apoyándome en todo momento en cada una de mis actividades, siempre haciéndome saber que yo podía, gracias te doy a ti por no dejarme ni un solo segundo en mis problemas tanto personales como universitarios, y tus gratas oraciones sobre mí.

Alexander Vidales Manrique

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos infinitamente a Dios, a nuestros padres y familiares; a el Ingeniero Pedro Meza nuestro tutor quien nos orientó para la exitosa realización de este proyecto.

A nuestro amigo y colega Edgar Altamiranda por su apoyo, consejos y acompañamiento en el último año.

A la Universidad de Cartagena, nuestra alma mater, por brindarnos una formación integral y por el apoyo económico para la realización de esta tesis.

A todos nuestros docentes por compartir su experiencia y conocimientos y a los directivos por trabajar día a día para lograr ser un programa de Ingeniería Química líder, consolidado y reconocido a nivel regional y nacional.

CONTENIDO

	pág
RESUMEN	13
INTRODUCCIÓN	15
1. OBJETIVOS	17
1.1.OBJETIVO GENERAL	17
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
2. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN	17
3. MARCO DE REFERENCIA	18
3.1. ANTECEDENTES	18
3.2. ESTADO DEL ARTE.....	21
3.3. MARCO CONCEPTUAL	24
3.3.1. Corrosión.....	24
3.3.2. Tipos de corrosión.....	25
3.3.3. Impacto de la corrosión	26
3.3.4. Control de la corrosión	27
3.3.5. Inhibidor de corrosión	28
3.3.6. Acero al carbono	31
3.3.7. Aluminio.....	32
3.3.8. Medios salinos.....	32
3.3.9. Árbol de Neem	32
3.3.10. Prueba fitoquímicas.....	33
3.3.11. Prueba de pérdida de peso.....	35
3.3.12. Isotermas de adsorción	35

4. METODOLOGÍA	38
4.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN	38
4.2. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN.....	38
4.2.1. Fuentes de información primaria.....	38
4.2.2. Fuentes de información secundaria	39
4.3. MUESTRA	39
4.4. OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES.....	39
4.5. DISEÑO EXPERIMENTAL	40
4.6. PROCEDIMIENTO	42
4.6.1. Obtención del extracto de las hojas del árbol de Neem	42
4.6.2. Caracterización del extracto	43
4.6.3. Prueba de pérdida de peso	43
4.6.4. Cálculo de la velocidad de corrosión	44
4.6.5. Cálculo de la eficiencia	44
4.6.6. Isotermas de adsorción	45
5. RESULTADOS: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN	47
5.1. CARACTERIZACIÓN FITOQUÍMICA DEL EXTRACTO	47
5.2. PRUEBA DE PÉRDIDA DE PESO	48
5.3. ANÁLISIS DE VARIANZA ANOVA.....	52
5.4. ISOTERMA DE ADSORCIÓN	54
6. CONCLUSIONES.....	59
7. RECOMENDACIONES.....	62
REFERENCIAS	63
ANEXOS	70

LISTA DE TABLAS

	pág
Tabla 1: Unidades de velocidad de corrosión-Constante K	35
Tabla 2: Operacionalización de las variables.....	40
Tabla 3: Diseño experimental	41
Tabla 4: Experimentos realizados	41
Tabla 5: Constituyentes fitoquímicos del extracto de Neem	47
Tabla 6: Comparativo de eficiencias de inhibición de la corrosión y grado de recubrimiento del extracto de Neem en la superficie de acero al carbono y aluminio.....	51
Tabla 7: Diseño experimental para el análisis de varianza ANOVA.....	52
Tabla 8: Análisis de varianza ANOVA para la eficiencia inhibidora.....	53
Tabla 9: Velocidad de corrosión, eficiencia de inhibición del acero al carbono en sulfato de sodio a diferentes concentraciones de extracto inhibidor, durante 24 horas de exposición.	58

LISTA DE FIGURAS

	pág
Figura 1: Proceso de la corrosión.....	25
Figura 2: Clasificación de la corrosión	26
Figura 3: Obtención del extracto de Neem	42
Figura 4: Montaje prueba pérdida de peso	44
Figura 5: Montaje pruebas isotermas de adsorción.....	45
Figura 6: Curvas de pérdida de peso vs Tiempo de inmersión para acero al carbono en cloruro de sodio y sulfato de sodio, en presencia y ausencia de extracto de Neem a diferentes concentraciones y 25°C.....	48
Figura 7: Curvas de pérdida de peso vs Tiempo de inmersión para aluminio en cloruro de sodio y sulfato de sodio, en presencia y ausencia de extracto de Neem a diferentes concentraciones y 25°C	50
Figura 8: Diagrama de Pareto estandarizado para la eficiencia de inhibición de la corrosión.....	53
Figura 9: Isoterma de adsorción de Langmuir	54

LISTA DE ECUACIONES

	pág
Ecuación 1: Eficacia de un inhibidor de corrosión	29
Ecuación 2: Eficiencia de un inhibidor de corrosión	29
Ecuación 3: Velocidad de corrosión	35
Ecuación 4: Isoterma de Langmuir	36
Ecuación 5: Representación gráfica Isoterma de Langmuir	37
Ecuación 6: Isoterma de Freundlich	37
Ecuación 7: Grado de recubrimiento de la superficie del metal	45
Ecuación 8: Ecuación Isoterma de Langmuir	54
Ecuación 9: Ecuación Energía libre de Gibbs	55

LISTA DE ANEXOS

	pág
Anexo A: Prueba fitoquímica del extracto de Neem (Azadirachta Indica)	71
Anexo B: Datos de prueba de pérdida de peso de las placas	72
Anexo C: Datos de prueba de isoterma de adsorción	76

RESUMEN

El principal objetivo del presente trabajo fue evaluar la eficiencia de inhibición de la corrosión del extracto de las hojas de Neem sobre acero al carbono y aluminio, en contacto con cloruro de sodio y sulfato de sodio. El primer paso para alcanzar este fin fue la obtención y caracterización del extracto, se realizaron pruebas fitoquímicas y se logró identificar dos componentes orgánicos responsables de la capacidad inhibidora de la corrosión, los taninos y fenoles relacionados con la eficiencia de inhibición, ya que tienen afinidad con la mayoría de los iones metálicos formando complejos sobre la superficie del metal evitando o retardando el proceso de corrosión. Luego, para calcular la eficiencia de inhibición se llevó a cabo una prueba de pérdida de peso, se determinó la velocidad de corrosión en presencia y ausencia del extracto y los resultados obtenidos demostraron que el extracto de Neem a menor concentración alcanzó mejores eficiencias sobre acero al carbono en cloruro de sodio con un porcentaje de 78,07569 para el 5% del extracto frente a 74,7896 % de eficiencia para la concentración del 10%; en el caso del aluminio los valores de eficiencia alcanzados fueron bastante bajos (6,6754%, -121,2733%) esto indicó, que el extracto no es eficiente para este metal en ninguno de los medios corrosivos.

Finalmente, mediante el ajuste a la isoterma de Langmuir se logró determinar que el mecanismo de adsorción, es decir, la interacción entre el inhibidor y el metal expuesto al electrolito o medio corrosivo se presenta mediante fisorción, lo cual mostró que el extracto fue adsorbido espontáneamente en la superficie del acero al carbono y permitió retardar el proceso corrosivo alcanzando eficiencias de inhibición del 28,125 al 90,625%, presentando un comportamiento directamente proporcional con la concentración de extracto. Los resultados de esta investigación permiten establecer que el extracto de Neem tiene un alto potencial como inhibidor de la corrosión para ser aplicado en la industria naval y petroquímica de la ciudad, como medio preventivo de la corrosión.

Palabras clave: Corrosión, inhibidor, extracto de Neem, acero al carbono, aluminio, cloruro de sodio y sulfato de sodio.

ABSTRACT

The main objective of this study was to evaluate the efficiency of corrosion inhibition extract of Neem leaves on carbon steel and aluminum in contact with sodium chloride and sodium sulfate. First was the preparation and characterization of the extract, phytochemical tests were did it and we identified two organic components responsible of the capacity of corrosion inhibition, tannins and phenols related inhibition efficiency as they have affinity with most of the metal ions forming complexes on the surface of the metal by preventing or retarding the corrosion process. Then, to calculate the inhibition efficiency was carried out a test of weight loss , it was determined the corrosion rate in the presence and absence of the extract and the results showed that the extract of Neem a lower concentration achieved better efficiencies on steel carbon sodium chloride with a percentage of extract 5% 78.07569 against 74.7896 % efficiency for the 10% concentration , in the case of aluminum achieved efficiency values were quite low (6.6754 % -121.2733 %), this indicated that the extract is not efficient for this metal in any of the corrosive media.

Finally, by adjusting the Langmuir isotherm it was determined that the mechanism of adsorption, in the interaction between the inhibitor and the metal is exposed to the electrolyte or corrosive environments presented by physisorption, which showed that the extract was spontaneously adsorbed on the surface of carbon steel and allowed retard the corrosive process efficiencies inhibition reaching 28,125 to 90,625 %, presenting a behavior proportional to the concentration of extract. The results of this investigation establish that Neem extract has a high potential as a corrosion inhibitor to be applied in shipbuilding and petrochemical industry in the city, as a preventive of corrosion.

Keywords: Corrosion inhibitor, neem extract, carbon steel, aluminum, sodium chloride and sodium sulfate.

INTRODUCCIÓN

La corrosión se define como el ataque destructivo de un metal por reacción química o electroquímica con el medio ambiente (Uhlig y Revie; 2008), los costos debidos a este fenómeno son enormes y se estima que corresponde del 2 al 4% del producto interno bruto de un país industrializado (Huu, 2004; Ahmad, 2006; Uhlig y Revie, 2008) y se calcula que al menos el 40% de las pérdidas pueden evitarse utilizando las tecnologías de prevención disponibles (Godínez et al,2003); esta es la razón principal que motiva a investigadores a usar y desarrollar técnicas para la prevención y control de la corrosión como protección catódica, recubrimientos anticorrosivos e inhibidores de corrosión (Uhlig y Revie; 2008), así como la búsqueda de soluciones innovadoras para los impactos ambientales que genera este fenómeno.

Una de las principales medidas de control y prevención de la corrosión es el uso de inhibidores, estas son sustancias que al adicionarse en un medio disminuyen la velocidad de corrosión mediante la formación de una capa protectora entre el metal y el medio. Los inhibidores pueden ser de origen químico o vegetal. En la actualidad, los más utilizados son los químicos, pero con el pasar de los años esto ha cambiado como producto de investigaciones que se vienen adelantando a nivel local y mundial en la obtención de inhibidores de corrosión a partir de sustancias de origen vegetal provenientes de plantas y árboles como *Azadirachta indica* (Neem), *Punica granatum* (granado) y *Momordica charantia*; Miel natural, árbol *Nypa fruticans*, (Quraishi, Faroogi y Saini, (1999)); El-Etre y Abdallah (2000), Orubite y Oforka (2004)). Estos estudios han demostrado mediante pruebas electroquímicas, de pérdida de peso, entre otros, que presentan una alta eficiencia en la inhibición de la corrosión en acero, aluminio y cobre, tanto en soluciones ácidas como salinas. Además a diferencia de los inhibidores químicos, no son tóxicos ni nocivos para el medio ambiente, se obtienen mediante tecnologías limpias, y no acarrear altos costos, principalmente por la gran disponibilidad de estos recursos en muchas regiones del mundo; como el caso del departamento de Bolívar, cuya biodiversidad cuenta con una flora rica en plantas de diferentes clases y especies, por lo tanto es importante realizar investigaciones

para el aprovechamiento sostenible de la biodiversidad de la región y sus aplicaciones en el sector industrial.

El presente proyecto tiene como propósito evaluar la eficiencia de los extractos de la hoja del árbol de Neem (*Azadirachta indica*) en la inhibición de la corrosión de acero al carbono y aluminio en soluciones salinas de cloruro de sodio y sulfato de sodio, para lo cual se realizará una caracterización de los extractos mediante pruebas fitoquímicas, posteriormente, por prueba de pérdida de peso se podrá calcular la velocidad de corrosión en los dos metales, todos los experimentos tendrán lugar en la Universidad de Cartagena en los laboratorios de la Facultad de Química y Farmacia y de Ingeniería Química respectivamente. Se espera determinar en qué metal, en qué solución salina y con qué concentración del extracto se logra mayor eficiencia en la inhibición de la corrosión.

El desarrollo de tecnologías y/o alternativas de este tipo para el control y prevención de la corrosión, será de mucha utilidad en Cartagena, pues esta al ser una ciudad costera es vulnerable a los procesos corrosivos. Estos avances representarán un ahorro bastante considerable para todas las industrias que tienen sus instalaciones en la Zona Industrial de Mamonal. Con la obtención de inhibidores de corrosión a partir de extractos vegetales se garantiza el aprovechamiento sostenible de una materia prima biodegradable y que no representa riesgos ambientales, gracias a que son productos de origen natural y no están compuestos como los inhibidores químicos por aniones, sales, metales pesados y altamente tóxicos, los cuales además requieren de tecnologías complejas y altamente contaminantes para su producción. Lo anterior demuestra la importancia y viabilidad del presente proyecto, debido a que el árbol *Azadirachta Indica* (Neem) es un recurso que se encuentra en gran proporción en el departamento de Bolívar, específicamente en la región de los Montes de María; por lo cual la obtención de inhibidores de corrosión sería un primer paso para el impulso de la agroindustria en la región, contemplado como uno de los objetivos estratégicos del Plan Regional de Competitividad de Cartagena y Bolívar 2008-2032 (Comisión Regional de Competitividad de Cartagena y Bolívar, 2010), contribuyendo de esta manera a la generación de empleos.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la eficiencia en la inhibición de la corrosión de los extractos del árbol de Neem (*Azadirachta indica*) sobre placas de acero al carbono y aluminio en medio salino.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar los extractos del árbol de Neem mediante pruebas fitoquímicas para identificar los principales grupos funcionales.
- Calcular la velocidad de corrosión mediante prueba de pérdida de peso variando la concentración de inhibidor, el medio corrosivo y el metal expuesto a este, para la evaluación de la eficiencia de inhibición de los extractos de Neem.
- Determinar el mecanismo de adsorción mediante el cálculo de isothermas para conocer la interacción entre el inhibidor y los metales.

2. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

El presente trabajo de investigación se limitará a la obtención y posterior caracterización de un inhibidor de corrosión a partir de los extractos de la hoja del árbol de Neem (*Azadirachta Indica*) en medio salino específicamente cloruro de sodio y sulfato de sodio al 3.5 % p/v, evaluado en acero al carbono y aluminio. Mediante prueba de pérdida de peso se calculará la velocidad de corrosión sobre los dos metales; con esta información y realizando isothermas para establecer la interacción entre los extractos inhibidores y los metales podrá evaluarse la capacidad inhibidora de corrosión de los extractos; lo cual permitirá concluir si el extracto obtenido es eficiente y de ser así, a qué concentración de extracto, sobre qué metal y con qué solución salina se logra una mayor eficiencia.

3. MARCO DE REFERENCIA

3.1. ANTECEDENTES

El uso de inhibidores de corrosión a partir de extractos de plantas ha sido objeto de estudio en los últimos trece años en países como Egipto, India y Nigeria. Las investigaciones incluyen una gran variedad de plantas y compuestos amigables con el medio ambiente, evaluando su eficiencia sobre algún tipo de metal en medio salino, medio básico o medio ácido, siendo este último el que ha despertado mayor interés. En Latinoamérica, el uso, investigación e implementación de este tipo de tecnología no se ha logrado a un ritmo tan acelerado como en los países del continente asiático y africano.

Los científicos de la India, Quraishi, Faroogi y Saini (1999); evaluaron la eficiencia de tres compuestos verdes o amigables con el medio ambiente para la obtención de inhibidores de corrosión sobre acero en cloruro de sodio en comparación con un inhibidor bastante usado: ácido hidroxietilidendifosfónico (HEDP). Utilizaron hojas de *Azadirachta indica* (Neem), cáscaras de *Punica granatum* (granado) y frutos de *Momordica charantia* (melón amargo); las tres plantas presentaron una alta inhibición de corrosión, esta se atribuye a la adsorción de los componentes orgánicos (proteínas, carbohidratos, calcio, caroteno, taninos, tiamina, ácido ascórbico, riboflavina), de los extractos de las plantas sobre la superficie del acero, que permitió la formación de complejos y disminuyó la velocidad de disolución del metal. Esta investigación presenta un diseño experimental bastante sencillo debido a que el único factor es el inhibidor evaluado; variables como el medio corrosivo, el material expuesto y la concentración del inhibidor que son de gran importancia no son objeto de estudio. Además, la concentración fijada para los experimentos no es mencionada.

El-Etre y Abdallah (2000) comprobaron el desempeño de la miel natural como inhibidor de corrosión sobre acero al carbono en agua de alta salinidad, basando su investigación en un estudio hecho previamente por uno de los autores evaluando la miel natural pero sobre cobre en solución acuosa (El-Etre (1998) citado por El-Etre y Abdallah (2000)). Se demostró luego de practicar pruebas de pérdida de peso y polarización potencioestática, que

la miel natural es un muy buen inhibidor de corrosión en acero al carbono y que la concentración de miel natural es directamente proporcional a la eficiencia del inhibidor. Al transcurrir un tiempo mayor a cinco días la eficiencia inhibidora de la corrosión disminuyó, se presume que la causa es la formación de hongos lo cual depende de la concentración de sales presentes en el agua pero esta afirmación no pudo corroborarse puesto que la salinidad del agua se mantuvo como una constante. Debido a que la investigación estaba encaminada solo a comparar los resultados con un estudio hecho previamente, el extracto inhibidor no fue sometido a técnicas para identificar las sustancias que le confieren la capacidad inhibidora de la corrosión.

El-Etre (2003) evaluó la capacidad inhibidora de los extractos de *Tallo Opuntia* (Nopal) en aluminio por pruebas de pérdida de peso, termometría, evolución de hidrógeno y técnicas de polarización. El extracto de *Opuntia* contiene principalmente una mezcla de dos polisacáridos: mucílagos y pectina. El mucílago, extraído de la cladodios (tallos modificados), contiene residuos de D-galactosa, D-xilosa, L-ramnosa, L-arabinosa y ácido D-galacturónico. La adsorción de estos compuestos sobre la superficie del electrodo hace una barrera para las transferencias de masa y carga. Esta situación conduce a una protección de la superficie metálica del ataque de los aniones agresivos del ácido. La temperatura es decisiva en este proceso debido a que a temperaturas superiores a 70°C disminuye notablemente la eficiencia en la inhibición de la corrosión.

Orubite y Oforka (2004), realizaron un estudio para comparar la acción inhibidora de las hojas del árbol *Nypa fruticans* con 1,5-difenilcarbazona (DPC), sobre acero inoxidable en ácido clorhídrico. Se efectuó una prueba de pérdida de peso en la que se realizaron experimentos con soluciones de HCl 0.1, 0.5, 1.5, 2.0, 2.5 y 3.0 M a 30, 40, 50 y 60 °C; los cupones de acero se suspendieron con intervalos de 24 horas durante 7 días. Los extractos de las hojas presentaron una eficiencia de 75.11 % frente a 70.18% del DPC, lo que evidencia que el *Nypa fruticans* es un buen inhibidor de acero inoxidable en medio ácido, además, las mayores eficiencias de *Nypa fruticans* y DPC se alcanzan a la temperatura más baja es decir a 30°C, esto se debe a que al aumentar la temperatura aumenta la velocidad de

la reacción química y por ende la velocidad de corrosión, por lo cual una baja temperatura favorece el proceso de inhibición.

Las semillas de Khillah (*Ammi visnaga*) fueron utilizadas por El-Etre (2006), para la obtención de un inhibidor de corrosión evaluado sobre acero XS 316 (se diferencia de otro tipo de aceros por contener níquel y molibdeno), en una solución de ácido clorhídrico (HCl). Las Semillas de Khillah contienen una pequeña cantidad de aceite graso volátil, cumarinas y furanocromonas como khella y visnaga. A las furanocromonas se les atribuye el efecto inhibidor del extracto debido a que al estudiar sus estructuras químicas se encontró que pueden adsorber sobre la superficie del metal los pares de electrones presentes en sus átomos de oxígeno; la adsorción de estos compuestos sobre la superficie metálica crea una barrera para la transferencia de carga y masa que conduce a disminuir la interacción del metal con el ambiente corrosivo, como resultado la velocidad de corrosión en las muestras de acero utilizadas con un área de superficie de 25 cm^2 (2 cm x 5.6 cm x 0.2 cm) disminuye. Además el aumento en la temperatura no favorece la eficiencia del inhibidor.

La acción inhibidora de los extractos de hojas de *Sansevieria trifasciata* en la corrosión del aluminio en soluciones de ácido clorhídrico e hidróxido de sodio 2M, Oguzie (2007) la estudió usando técnicas gasométricas como curvas de corrosión vs tiempo. Con el análisis inicial del extracto se identificó la presencia de alcaloides, taninos, saponinas y flavonoides, pero debido a la compleja composición química del extracto, no fue posible asignar el efecto inhibidor a un constituyente particular. La adsorción de los compuestos sobre la superficie de aluminio reduce el área superficial disponible para la corrosión.

3.2. ESTADO DEL ARTE

Los extractos de hojas y semillas de *Phyllanthus amarus* (Quebra Piedra) fueron evaluados como inhibidores de corrosión en soluciones de ácido sulfúrico y ácido clorhídrico en acero dulce. Los investigadores (Okafor et al, 2008) utilizaron un rango de concentraciones de extracto inhibidor bastante pequeño (0.1 g/L -2 g/L), por ende no se realizó un estudio exhaustivo de la relación de la concentración con la eficiencia en la inhibición de la corrosión. Sin embargo, si fue posible identificar los componentes fitoquímicos de los extractos responsables de inhibir la corrosión, tales como, grasas, proteínas, saponinas, taninos, alcaloides, oxalatos, glucósidos cianogénicos e hidratos de carbono; los cuales son adsorbidos químicamente en la interfaz solución-acero y disminuyen la velocidad con la que el metal se corroe por el contacto que tiene con el medio ácido.

Satapathy y colaboradores (2009), estudiaron la inhibición de la corrosión de los extractos de la planta *Justicia gendarussa* en solución de ácido clorhídrico sobre placas de acero variando la concentración del extracto de 0 a 150 ppm. Los principales componentes de la planta a los que se les atribuye el efecto inhibidor son aminas aromáticas y flavonoides debido a que el metal adsorbe sobre su superficie estas moléculas del inhibidor y se bloquean los sitios de reacción por lo que la superficie disponible para la zona de iones H⁺ se reduce, y se crea una capa de protección de cloruro y óxidos de hierro. Finalmente, lograron demostrar mediante pruebas de pérdida de peso y técnicas electroquímicas que la concentración del extracto es directamente proporcional a la eficiencia en la inhibición, alcanzando la mayor eficiencia del 93% a una concentración de 150 ppm.

A partir de la planta algodón de seda o *Calotropis procera*, se obtuvieron extractos con los cuales se evaluó su posible capacidad inhibidora de la corrosión en hidróxido de sodio sobre placas de acero, en esta investigación Kumar y colaboradores (2009) utilizaron diferentes concentraciones de inhibidor y de hidróxido de sodio y concluyeron que con una menor concentración de hidróxido de sodio y una alta concentración de inhibidor, se logró disminuir considerablemente la velocidad de corrosión y aumentar la eficiencia inhibidora. A nivel químico, se presenta adsorción de nitrógeno, azufre y oxígeno (compuestos

presentes en los extractos) en la superficie del metal y se formó una capa protectora que reduce el área superficial expuesta a la corrosión. La solución hidróxido de sodio-extracto de la planta reacciona con el acero y se forma ferrato de sodio, este se descompone y el hidróxido de sodio es regenerado continuamente lo que causa más disolución en el acero.

La corrosión de metales por el contacto con medios ácidos es ampliamente estudiada a nivel mundial, por lo cual Nahlé et al (2010) evaluaron el uso de la planta *Azadirachta Indica* o árbol de Neem, como inhibidor de la corrosión para el acero al carbono en ácido clorhídrico. Luego de la obtención del extracto inhibidor, este fue caracterizado mediante pruebas electroquímicas y se encontró que los componentes responsables de la inhibición son los taninos debido a que tienen la capacidad de formar sales con iones férricos formando una red de sales que protegen la superficie del metal, y los triptenos gracias a que cuentan con grupos funcionales que pueden interactuar con la superficie del metal y lo protegen del ataque de los iones hidronio. Para calcular la eficiencia inhibidora los extractos fueron sometidos a pruebas de pérdida de peso a varias concentraciones y temperaturas y se concluyó que debía mantenerse una temperatura igual o menor a 303 K para garantizar una alta eficiencia de inhibición de la corrosión, pues la velocidad de corrosión y la temperatura son directamente proporcionales.

En la evaluación de la inhibición de la corrosión de los extractos de *Azadirachta Indica* en medio ácido y sobre acero (Okafor, Ebenso, Udofot, 2010), encontraron que las moléculas del inhibidor se combinan con iones Fe^{+2} en la interface acero-inhibidor formando complejos gracias a la presencia de oxígeno, azufre y nitrógeno en su estructura; por lo cual se crea una barrera para la transferencia de masa que condujo a una disminución en la interacción entre el metal y el ambiente corrosivo. Para comprobar el supuesto de que la eficiencia inhibidora de la corrosión es directamente proporcional a la concentración del extracto inhibidor, se hizo un estudio en función de la concentración del extracto pero el rango de valores era bastante pequeño, lo cual no permitió conocer con certeza la proporción en que aumenta una variable en relación con la otra.

La acción inhibitoria de los extractos de *Jasminum nudifloru* se atribuyó a la adsorción de sus componentes sobre la superficie de aluminio, entre los que se encuentran: *Jasmoside*, *Jasminyroside*, *Jasminin*. Cada uno de estos compuestos contiene átomos de oxígeno en los grupos funcionales O-H, CO, C, que cumple las condiciones de medida generales para los típicos inhibidores de la corrosión. Los máximos valores de eficiencia se alcanzaron a altas concentraciones de extracto, baja concentración de ácido clorhídrico y en un tiempo máximo de inmersión de 20 horas. (Deng, (2012).

Las hojas de bambú tienen en su estructura dos compuestos orgánicos de origen natural: flavonoides, y aminoácidos a los que se le atribuye la capacidad inhibitoria de la corrosión de numerosos metales, con este indicio Xianghong y colaboradores (2012) decidieron evaluar si los extractos de las hojas de esta planta inhibían satisfactoriamente la corrosión del acero en dos medios ácido sulfúrico y ácido clorhídrico. Una vez terminados los experimentos, se encontró que la eficiencia en la inhibición de la corrosión es inversamente proporcional con la concentración del ácido, y directamente proporcional con la del extracto inhibitor, además transcurrido un tiempo de 60 horas la eficiencia permanece aproximadamente constante presentando unas leves fluctuaciones: este comportamiento se presentó hasta concluir el experimento en un total de 180 horas.

3.3. MARCO CONCEPTUAL

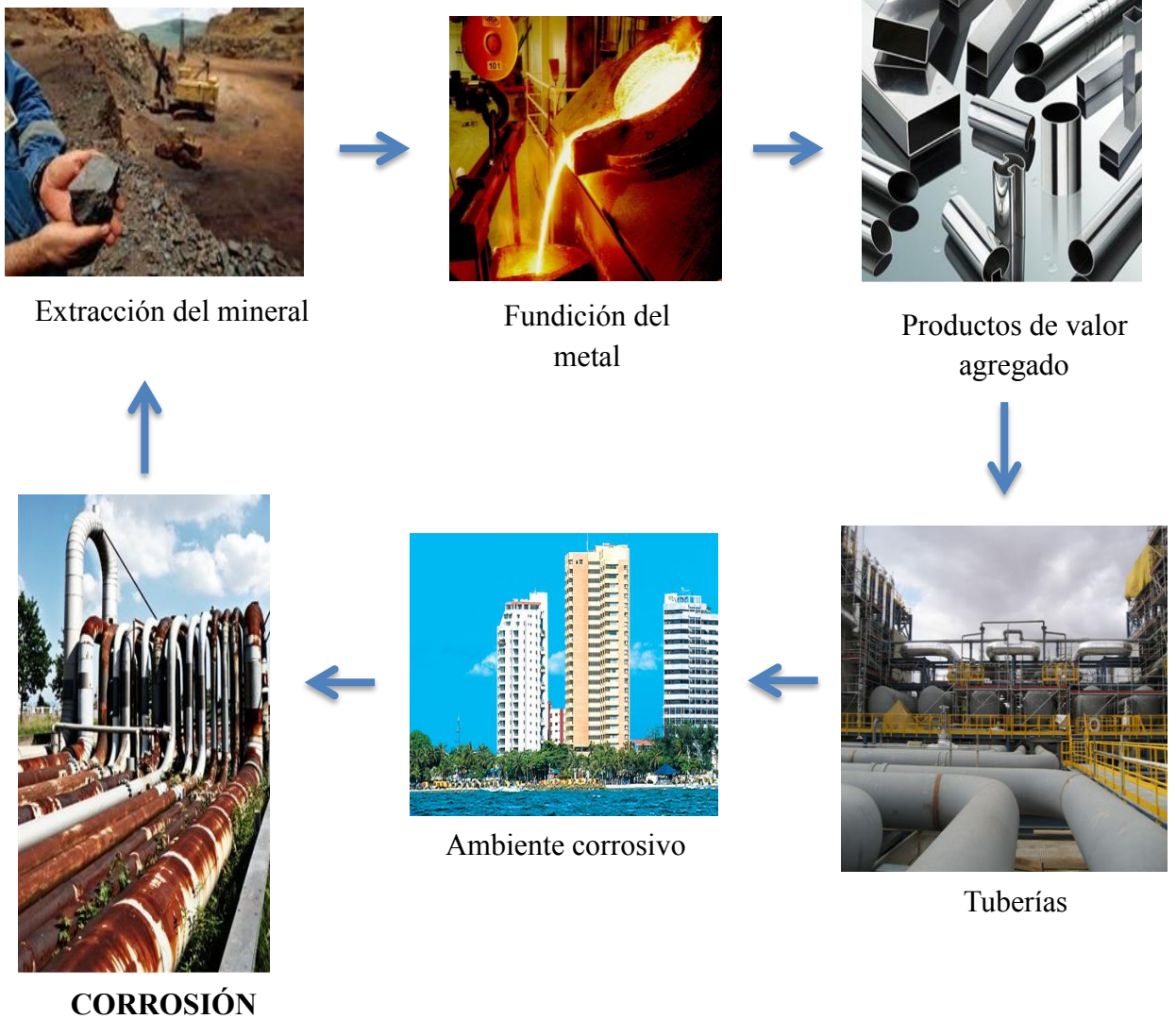
3.3.1. CORROSIÓN

La corrosión es la degradación o destrucción que sufren los metales a causa de una reacción química o electroquímica con el ambiente al que se encuentra expuesto (agua, atmósfera, aire, agua salada, sustancias ácidas, entre otros). Este es un fenómeno espontáneo, pues todos los metales presentan una tendencia a perder electrones (oxidarse), regresando así a su estado natural (estable termodinámicamente) en el cual están combinados formando óxidos, sales, hidróxidos, minerales, entre otros. Los materiales no metálicos como las cerámicas y polímeros pueden deteriorarse por ataques químicos pero a este fenómeno se le conoce como degradación (Gómez De León, (2004)).

Todos los materiales presentan un comportamiento diferente ante este fenómeno, por ello es importante además de determinar la tendencia a corroerse la velocidad con que esto sucederá, por ejemplo los aceros inoxidable en presencia de cloruros o sustancias ácidas presenta una velocidad de corrosión bastante rápida, por el contrario en un tornillo expuesto a temperatura y presión ambiente pasará un tiempo prolongado antes de verse signos de corrosión.

En general, los metales en su estado puro son obtenidos de los minerales, óxidos, hidróxidos o sales en los que se encuentran formando compuestos estables. Posteriormente, son sometidos a procesos químicos o físicos como fundición, extrusión, reducción, refinado, entre otros esto con el fin de obtener productos de valor agregado: tubos, tornillos, láminas y materiales con los que se construirán carros, tuberías, maquinaria, plantas industriales, plataformas petroleras marinas, dispositivos electrónicos etc. Al transcurrir un tiempo determinado los metales reaccionan con el ambiente y en ese momento inicia la corrosión debido a que estos elementos tienen una tendencia inherente a regresar a su estado natural; convirtiéndose esto en un proceso cíclico dado que los metales que regresan a su estado natural luego son transformados nuevamente. (Ver Figura 1).

Figura 1: Proceso de la corrosión.

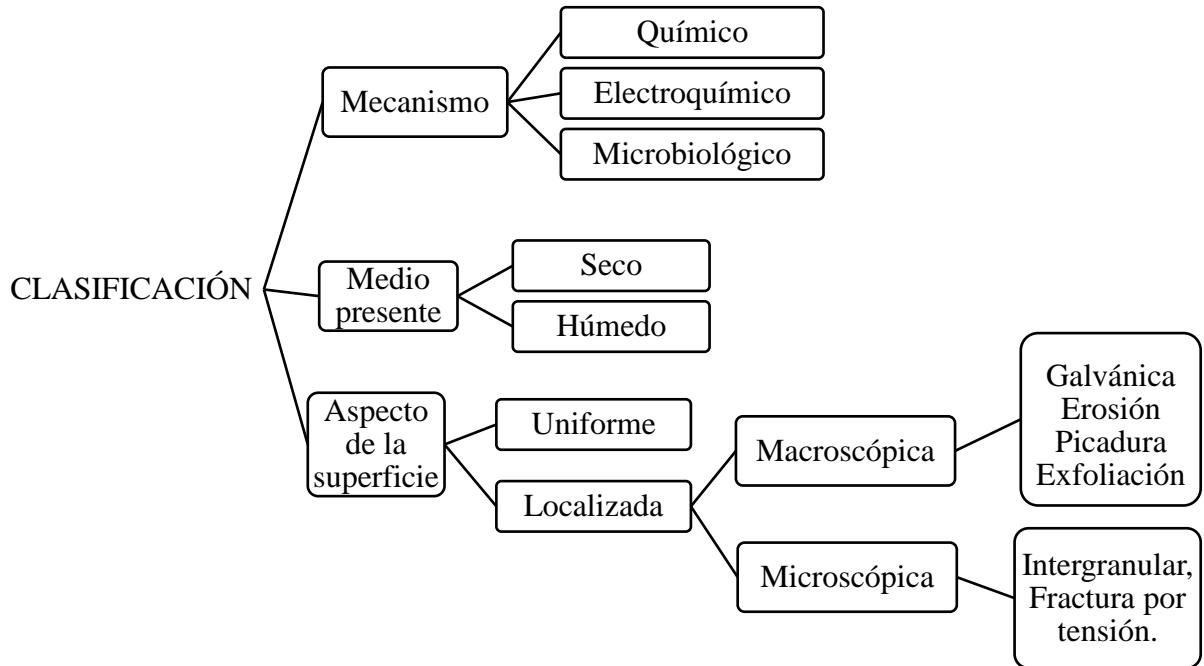


Fuente: Figura realizada para el presente trabajo.

3.3.2. TIPOS DE CORROSIÓN

Se debe identificar qué clase de corrosión se presenta de acuerdo al medio, al material y la reacción que se lleva a cabo, pues de estos factores depende que método de control y/o mitigación deba aplicarse. La clasificación de los tipos de corrosión se realiza en base a tres factores muy importantes: naturaleza o medio, mecanismo de corrosión y apariencia de la superficie (Hernández, 2002). Ver Figura 2.

Figura 2: Clasificación de la Corrosión.



Fuente: Hernández, 2002

3.3.3. IMPACTO DE LA CORROSIÓN

- De no controlarse la corrosión esta pone en peligro la seguridad e integridad de equipos como calderas, recipientes metálicos para productos químicos tóxicos, turbinas, rotores, puentes, componentes de automóviles y aviones. De presentarse algún fallo en los equipos anteriormente mencionados se presentarían consecuencias catastróficas.
- En el diseño de equipos para centrales nucleares y en la eliminación de los desechos nucleares, la seguridad es primordial por lo que es en una de las instalaciones donde más atención se debe tener al control y prevención de la corrosión.

La economía es sin duda lo que impulsa las grandes industrias y en general todos los procesos productivos realizados por el hombre, por lo que se ve altamente afectada por los costos que trae consigo la corrosión.

- Pérdidas económicas o costos directos: costos de sustitución de estructuras y equipos corroídos y la mano de obra requerida para ello, costos de la galvanización o niquelado de acero, de la adición de inhibidores de corrosión al agua, y deshumidificación de salas de almacenamiento para equipos metálicos. Incluye además los precios por reemplazar varios millones de tanques de agua caliente domésticos cada año a causa de la corrosión y la necesidad de la sustitución de millones de silenciadores de automóviles oxidados.
- Las principales pérdidas indirectas, (Uhlig y Revie; 2008).
 - a) Paradas en las Plantas: la sustitución de líneas de tuberías oxidadas, paredes deterioradas y corroídas conlleva a parar la planta, esto se traduce en disminución en la producción y ganancias de las empresas.
 - b) Pérdida de Productos: al presentarse agujeros o grietas en tanques de almacenamiento y tuberías conductoras de fluidos, dependiendo el fluido puede llevar además a un desastre ambiental por ejemplo derrame de petróleo.
 - c) Pérdida de Eficiencia de los equipos al haber acumulación de óxidos. En el caso de intercambiadores de calor esto ocasiona una disminución de la conductividad térmica, en bombas se reduce la capacidad para impulsar fluidos.

3.3.4. CONTROL DE LA CORROSIÓN

Son varias las medidas que se pueden adoptar para evitar, controlar, retrasar y detectar la corrosión. Todas son válidas y el uso de cada una de ellas dependerá de las condiciones ambientales y económicas que se estén presentando.

- a) Selección de materiales: La corrosión es la causa principal de la destrucción de los equipos de la industria química (Bilurbina; liesa; Iribarren, 2003), pero tal destrucción puede prevenirse al escoger adecuadamente el material en el que se va a construir el equipo teniendo en cuenta: con que fluidos tendrá contacto y el medio al que se encontrará expuesto; esto permitirá además alargar la vida útil del equipo retrasando el momento en que aparecerá la corrosión.

- b) Recubrimientos protectores y Protección Catódica. Medidas o técnicas más precisas después de la selección del material son las siguientes:
 - Recubrimientos: Un recubrimiento actúa como una barrera entre el electrolito o agente oxidante y el metal, para evitar que este se acumule en la superficie. Existen varios tipos de recubrimientos: metálicos, de conversión y orgánicos.
 - Protección catódica: Es un método para reducir o eliminar la corrosión de un metal, haciendo que, la superficie de este, funcione completamente como cátodo cuando se encuentra sumergido o enterrado en un electrólito”. Esto se logra haciendo que el potencial eléctrico del metal a proteger se vuelva más electronegativo mediante la aplicación de una corriente directa o la unión de un material de sacrificio (comúnmente magnesio, aluminio o zinc), (Hernández, 2002).

- c) Inspección y monitoreo. La inspección y monitoreo de los equipos es necesario realizarla para verificar el estado en que estos se encuentran. Los equipos deben estar libres de grietas, fugas y desgastes, lo contrario sería un indicativo de corrosión lo que implicaría cambiar alguna parte o el equipo en su totalidad para evitar accidentes.

3.3.5. INHIBIDOR DE CORROSIÓN

Por definición un inhibidor de corrosión es una sustancia química que al adicionarse en pequeña concentración a un medio, disminuye eficazmente la velocidad de corrosión porque adhiriéndose a la superficie metálica proporciona una película protectora (Uhlig y

Revie, 2008), modificando la cinética de las reacciones anódicas y/o catódicas. La efectividad de los inhibidores se explica mediante varios mecanismos. Algunos reaccionan con las especies químicamente activas de la disolución (tales como oxígeno) y las eliminan; otras moléculas de inhibidores atacan la superficie que está siendo afectada por la corrosión e interfieren en la reacción de oxidación o de reducción según sea el caso, o forman un recubrimiento protector muy delgado. Normalmente se utilizan inhibidores en los sistemas cerrados, tales como radiadores de automóvil e intercambiadores de calor (Callister, 1996).

Una de las formas más frecuentes de valorar la eficacia de un inhibidor es en función de la reducción porcentual de pérdidas de peso por corrosión viene dada de la siguiente manera:

$$\varepsilon = \frac{P_o - P_1}{P_o} \times 100 \quad (Ec. 1)$$

Donde P_o y P_1 representan las pérdidas de peso por efecto de la corrosión sin inhibidor y con inhibidor, respectivamente. De este modo, si la pérdida de peso una vez agregado el inhibidor descendiese hasta valores prácticamente nulos ($P_i \approx 0$) la eficacia del inhibidor se aproximaría a 100%. Por el contrario, si el efecto del inhibidor fuese inapreciable se seguiría observando una pérdida de peso similar a la que se tenían sin él ($P_i \approx P_o$) por lo que la eficacia resultaría prácticamente nula. (Gómez De León, (2004)).

La eficiencia de un inhibidor tiene como objetivo disminuir la velocidad de corrosión sobre el metal, de esto para medir la eficiencia de un inhibidor tenemos que:

$$Eficiencia\ de\ inhibicion(\%) = \frac{vc - vc_{inhibidor}}{vc} \times 100 \quad (Ec. 2)$$

Donde vc , es la velocidad de corrosión sin inhibidor y $vc_{inhibidor}$ corresponde al sistema al que se le ha adicionado un inhibidor.

Los inhibidores de corrosión pueden clasificarse de acuerdo a su origen en inhibidores químicos e inhibidores vegetales.

a) INHIBIDORES QUÍMICOS:

Los inhibidores químicos como su nombre lo indica provienen de sustancias químicas, por medio de una mezcla de componentes solubles entre sí; son los más usados en la industria por su eficiencia a la hora de evitar que equipos, maquinaria y construcciones se deterioren a causa de la corrosión, pero presenta una gran desventaja la cual es su alta toxicidad. Este tipo de inhibidores se clasifican en orgánicos e inorgánicos.

- Los inhibidores químicos orgánicos consisten en moléculas carboxílicas, de naturaleza polar por lo que son atraídos a las zonas donde se crean los pares galvánicos originarios de la corrosión. Son adsorbidos química o físicamente sobre la superficie del metal, presentándose más frecuentemente la quimiadsorción la cual involucra la transferencia de carga entre la molécula orgánica y el metal; este es un proceso lento y requiere una energía de activación. El proceso de inhibición consta de dos etapas, primero el compuesto orgánico se fija a través de sus grupos polares a la superficie del metal y luego se da la formación de iones complejos, polimerización o formación de precipitados sobre la superficie. (Bilurbina; liesa; Iribarren, 2003).
- Los inhibidores inorgánicos son pasivantes, es decir son agentes oxidantes que pueden reducirse y actúan entre pH de 6-9. Forman un óxido pasivante asociado muchas veces con la formación de trazas de hidróxidos. En la práctica existe una concentración crítica que mantiene la pasivación de la superficie metálica, por ejemplo para los nitratos, cromatos y molibdatos es de 10^{-3} a 10^{-4} M; en presencia de halógenos o sulfatos y a altas temperaturas se necesitan concentraciones superiores. Pero estos inhibidores son tóxicos, muy costosos y su utilización está restringida.

b) INHIBIDORES VEGETALES

A diferencia de los inhibidores químicos, los inhibidores vegetales se obtienen con más facilidad y además presentan un bajo costo. Este tipo de inhibidores se obtienen de plantas

y/o vegetales, esta técnica se viene empleando por las desventajas de usar los inhibidores químicos. Los extractos, en el caso de los árboles se consiguen usando los frutos, flores, hojas, semillas, raíces, tallos. En los último 15 años aproximadamente se han llevado un gran número de estudios sobre este tema, en la mayoría la capacidad inhibidora se atribuye a la presencia de compuestos como saponinas, taninos, flavonoides y aminoácidos. Estos son adsorbidos en la interfaz metal-inhibidor y crean una barrera a la transferencia de masa y carga que disminuye la interacción entre el metal y el medio al que se encuentra expuesto y producto de ello la velocidad de corrosión también disminuye (Okafor et al, 2010).

3.3.6. ACERO AL CARBONO

El acero al carbono es una aleación de hierro y carbono, está compuesto de ciertas cantidades mínimas de manganeso, silicio, fósforo, y azufre, pero como impurezas; se clasifica en función a la proporción (en peso) del contenido de carbono, en primer lugar, el acero al bajo carbono, también conocido como acero suave o dulce, tiene menos de 0.3% de carbono. Comúnmente es utilizado para productos industriales como pernos, tuercas, láminas, placas y tubos, y para componentes de maquinaria que no requieren de alta resistencia.

El acero medio carbono, tiene de 0.3% a 0.6% de carbono, es utilizado en aplicaciones que requieren una resistencia más elevada a la disponible en los aceros de bajo carbono, como en piezas de equipo de maquinaria automotriz y equipo agrícola (engranes, ejes, bielas, cigüeñales), en equipo de ferrocarriles, y en piezas para maquinaria de trabajado de metales. (Kalpakjian, Schmid, Figueroa, 2002).

El acero al alto carbono tiene más de 0.6% de carbono. Se utiliza por lo general para partes que requieran resistencia mecánica, dureza y resistencia al desgaste, como las herramientas de corte, cable, resortes, cuchillería.

Mientras más elevado sea el contenido de carbono del acero, más alta será su dureza, su resistencia mecánica y su resistencia al desgaste después del tratamiento térmico. (Kalpakjian, Schmid, Figueroa, 2002).

3.3.7. ALUMINIO

El aluminio es el tercer elemento más común encontrado en la corteza terrestre y se ha convertido en el metal más importante tras el hierro. El aluminio puro sobresale por su poco peso, sus elevadas conductividades eléctrica y térmica y su resistencia a la corrosión. El aluminio puro es muy reactivo químicamente y al estar en contacto con aire, en su superficie se forma una capa de óxido adherente y compacto, el cual es resistente a un gran número de ambientes corrosivos debido a que actúa como una barrera protectora para el aluminio subyacente. (DeGarmo, Black, Kohser, 2002).

3.3.8. MEDIOS SALINOS

A nivel mundial, gran cantidad de empresas se encuentran ubicadas en sitios costeros debido a las ventajas que esto trae al momento de importar o exportar productos y materias primas. Sin embargo, la preferencia a este tipo de lugares las expone al indeseado fenómeno de la corrosión, la cual representa un serio problema que anualmente les ocasiona millonarias pérdidas económicas. La ocurrencia de dicho fenómeno se debe a las características del medio en el que se encuentran localizadas las industrias; por lo general en las zonas costeras la humedad es muy elevada y produce corrosión en la infraestructura, la cual se ve acelerada por la gran cantidad de iones cloruro que se encuentra allí presente (medios salinos). Cabe resaltar que no solo se encuentran sales en el ambiente, sino diferentes tipos de impurezas que también interactúan con los metales de la infraestructura de las instalaciones, aumentando así la velocidad de corrosión.

3.3.9. ÁRBOL DE NEEM

El nombre científico del neem es *Azadirachta indica* y pertenece a la familia Meliácea. Es un árbol originario de la India y Birmania de crecimiento rápido, necesita poca atención, da sombra, purifica el aire (Reyes, Valero & Garay, 2003) de tamaño de mediano a grande que alcanza alturas de hasta 20 m en condiciones óptimas, con un diámetro medio de la copa de 5 a 10m; caracterizado por su tallo corto y recto, una corteza arrugada de color de marrón oscuro a gris (Gómez et al, 2011).

Es de hojas verdes, de flores blancas y sus frutos contienen una sola semilla. Todas las partes del árbol poseen una aplicación bastante útil (López, 2006):

- La semilla contiene 20 % de aceite, denominado margosa o aceite de Neem el cual se extrae para la fabricación de jabones que por su contenido de ácido mirístico y laúrico presentan más espuma y detergencia que los obtenidos a partir de aceite comestibles como aceite de coco, palma africana y maní. Se producen además cosméticos, desinfectante, tónico capilar, medicamentos para tratar enfermedades de la piel, y en casos con condiciones específicas como combustible o lubricante.
- Los frutos y las hojas son comestibles por lo que sirven como forraje (alimento para el ganado).
- Del tronco y ramas se puede obtener un zumo refrescante.
- La corteza exuda una goma para la obtención de un extracto para combatir inflamaciones en la boca y prevenir caries.
- La madera (tronco) se usa como sustituta de la caoba.

La *Azadirachta indica* ha sido sembrada y establecida en los trópicos y subtrópicos en el Sur de Asia, Islas del Pacífico, Australia, Sur y Centro América, El Caribe, lugares en los que representa un papel importante en paisajes urbanos y rurales por su buena formación de copa y corto período de muda lo ha hecho una opción popular para plantas de sombra alrededor de edificios y a los lados de carreteras (Reyes, Valero & Garay, 2003).

3.3.10. PRUEBAS FITOQUÍMICAS

Las pruebas fitoquímicas permiten identificar la presencia o ausencia de alcaloides, flavonoides, terpenoides, glucósidos, cumarinas, quinonas, esteroides, saponinas, taninos, fenoles, grasas y aceites, debido a que a la presencia de algunos o todos estos compuestos se les atribuye la capacidad inhibidora de la corrosión a los extractos obtenidos a partir de plantas, árboles y sustancias de origen vegetal.

Los principales métodos utilizados para detectar la presencia de los constituyentes fitoquímicos en los extractos son:

- Método Soxhlet:

El método Soxhlet es una extracción semicontinua con un disolvente orgánico que se utiliza para remover grasas y aceites, el solvente debe ser escogido cuidadosamente debido a que debe disolver selectivamente solo al compuesto deseado. La sustancia escogida como disolvente es calentada en un matraz, se volatiliza y condensa goteando sobre el recipiente en el que se encuentra la muestra, la cual queda sumergida en este y se efectúa la extracción (Luque de Castro, Priego-Capote, 2010).

- Prueba de la espuma abundante:

La determinación de saponinas se realiza en base a su propiedad tensoactiva por lo que pueden producir espuma en soluciones acuosas; la prueba consiste en disolver la sustancia que se presume contiene este compuesto orgánico en agua y someterla a agitación para obtener espuma y posteriormente realizar una medición de la altura y estabilidad de esta en un tiempo determinado debido a que es el indicativo de la presencia y proporción de saponinas (Lozano et al, 2012).

- Método gelatina-sal:

La prueba consiste en colocar en contacto la sustancia objeto de estudio con el reactivo gelatina (1 g de gelatina pura hidratado con 100 mL de agua)-sal, si hay turbidez o formación de precipitado es prueba positiva para taninos en la muestra. Las sales utilizadas pueden ser cloruro férrico o cloruro de sodio (Cardona & Salazar, 2012).

- Fotocolorimetría:

La fotocolorimetría consiste en la determinar la concentración de una sustancia por la cantidad de color que posee naturalmente o que puede producir luego de una reacción cromática, este procedimiento está basado en el hecho que toda sustancia coloreada absorbe luz de una determinada longitud de onda (Quintero, 2013).

3.3.11. PRUEBA DE PÉRDIDA DE PESO

Este método permite determinar la cantidad de peso que pierde un determinado material sea metal puro o aleación luego de estar en contacto con un medio corrosivo, y así calcular la velocidad de corrosión definida como la cantidad de material por unidad de tiempo que se elimina como consecuencia de la reacción. Se calcula mediante la siguiente fórmula (Gómez De León, 2004):

$$v_{\text{corrosión}} = \frac{K \cdot W}{\rho \cdot A \cdot T} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

- W es la masa perdida después de un tiempo de exposición al medio.
- ρ es la densidad del material.
- A es el área de contacto.
- T es el tiempo de contacto.
- K es una constante de corrosión cuya magnitud depende del sistema de unidades que se emplee; en la siguiente tabla están los valores que esta puede tomar:

Tabla 1: Unidades de velocidad de corrosión-Constante K

Unidades de velocidad de corrosión	Constante de corrosión (K)
Milésimas de pulgada por año (mpy)	3.45×10^6
Pulgadas por año (ipy)	3.45×10^3
Pulgadas por mes (ipm)	2.87×10^2
Milímetros por año (mm/a)	8.76×10^4
Micrómetros por año ($\mu\text{m/a}$)	8.76×10^7
Picómetros por segundo (pm/s)	2.78×10^6

Fuente: Coatl, 2009.

Es importante mencionar que la velocidad de corrosión también es calculada a través de la pendiente de las gráficas de pérdida de peso donde se grafica la pérdida de peso vs el tiempo de exposición del metal al medio corrosivo.

3.3.12. ISOTERMAS DE ADSORCIÓN

La capacidad de adsorción está definida en base isotermas de adsorción en disolución, la cual es la relación de dependencia a una temperatura constante de la cantidad de adsorbato

o sustancia adsorbida por peso unitario de adsorbente, con respecto a la concentración del adsorbato en equilibrio (Ponce, 2005). Estas relaciones de equilibrio son gráficas en las que el eje de las abscisas está dado por la concentración de soluto en equilibrio en la solución, y en el eje de las ordenadas se ubica la concentración de soluto en equilibrio en la superficie del adsorbente.

La grafica puede presentar un comportamiento cóncavo hacia las abscisas lo que indica que es favorable porque se presenta adsorción aún en soluciones diluidas; y si la isoterma es cóncava hacia las ordenadas la adsorción es desfavorable.

Las isotermas que más se ajustan a los datos experimentales son las siguientes:

- a) Isoterma de Langmuir: asume que el sólido tiene una capacidad limitada de adsorción y que las moléculas son adsorbidas en sitios bien definidos que distan uno de otro lo suficiente para no permitir la interacción entre las moléculas adsorbidas en sitios adyacentes (Agouborde, 2008). Se utiliza para la quimisorción y la adsorción física a presiones bajas y temperaturas moderadamente altas. Se representa mediante la siguiente ecuación (Celaya,1998):

$$q = \frac{(q_{max}y)}{(k_d + y)} \quad (Ec. 4)$$

Donde

- q : cantidad de soluto adsorbido por una determinada cantidad de adsorbente.
- q_{max} : cantidad de soluto máxima absorbible por cantidad de adsorbente.
- K_d : constante de disociación.
- y : concentración de soluto en solución.

Los valores de q_{max} y K_d se determinan experimentalmente al graficar q^{-1} vs y^{-1} , con pendiente K_d/q_{max} y el punto en el origen para la ordenada es $1/q_{max}$:

$$\frac{1}{q} = \frac{K_d}{q_{max}y} + \frac{1}{q_{max}} \quad (Ec. 5)$$

b) La Isoterma de Freundlich se utiliza también para presiones bajas y representa la relación entre la concentración del soluto en la superficie del adsorbente y la concentración del soluto en el líquido con el que se encuentra en contacto; se representa por la siguiente ecuación exponencial (Celaya,1998):

$$q = K \cdot y^n \quad (Ec. 6)$$

Donde

- q: cantidad de soluto adsorbido por adsorbente.
- K: constante de equilibrio.
- n: constante adimensional que se determina experimentalmente.

4. METODOLOGIA

4.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

La evaluación de la capacidad inhibidora de la corrosión de los extractos del árbol de Neem (*Azadirachta indica*) en placas de acero al carbono y aluminio, en medio salino utilizando cloruro de sodio y sulfato de sodio, se realizó mediante una investigación cuantitativa de tipo experimental.

El extracto inhibidor se obtuvo a partir de 250 gramos de las hojas del árbol de Neem empleando 600 ml de agua destilada como solvente.

Para la caracterización de los extractos y el cálculo de la velocidad de corrosión se realizaron pruebas fitoquímicas y de pérdida de peso variando la concentración del inhibidor para determinar la óptima y sobre cuál de los dos metales era más eficiente.

4.2. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

4.2.1. Fuentes de información primaria

Las fuentes de información primaria para el presente proyecto fueron los datos de velocidad de corrosión y eficiencia inhibidora que se obtuvieron mediante pruebas fitoquímicas y de pérdida de peso, de acero al carbono y aluminio en cloruro de sodio y sulfato de sodio ambos al 3.5% p/v.

Las pruebas fitoquímicas se realizaron en el Laboratorio de la Facultad de Química y Farmacia de la Universidad de Cartagena y los ensayos de prueba de pérdida de peso en el Laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad de Cartagena.

4.2.2. Fuentes de información secundaria

Las fuentes secundarias consistieron en artículos científicos, tesis y patentes de las bases de datos de la Universidad de Cartagena, Science Direct, American Chemical Society, SpringerLink y Reaxis.

El análisis y revisión bibliográfica permitió establecer la metodología utilizada para la obtención, caracterización y estudio del extracto adecuados para trabajar con aluminio y acero al carbono, en las sales escogidas, así como para el cálculo de las velocidades de corrosión, eficiencia de inhibición e isothermas de adsorción.

4.3. MUESTRA

Las hojas del árbol de Neem (*Azadirachta indica*) requeridas para la obtención del extracto inhibidor provienen de la región de los Montes de María del departamento de Bolívar; se seleccionaron 250 gramos de hojas en el mejor estado, sin ningún signo de deterioro, decoloración, evitándose aquellas que estuvieran marchitas.

Las muestras de acero al carbono y aluminio corresponden a láminas de 5 x 4 cm con espesor de 3 mm y 5 x 4 cm con espesor de 1 mm, respectivamente compradas en la ferretería Ignacio Sierra Sucesores Ltda, ubicada en el Barrio el Bosque de la ciudad de Cartagena.

4.4. OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

Es importante y esencial, conocer las variables dependientes, independientes e intervinientes que participaron en el desarrollo de la investigación; en la siguiente tabla se describen cada una de ellas.

Tabla 2: Operacionalización de las variables

TIPO DE VARIABLE	VARIABLE	DEFINICIÓN	UNIDAD
DEPENDIENTE	Velocidad de corrosión	Pérdida de peso por unidad de tiempo que experimenta un metal o aleación al estar en contacto con un medio corrosivo.	L/T
INDEPENDIENTE	Metal	Metales a utilizar en las pruebas: aluminio y acero al carbono.	-
	Concentración extracto	Volumen de extracto adicionado al medio corrosivo.	% v/v
	Medio salino	Sales a utilizar: cloruro de sodio y sulfato de sodio.	-
INTERVINIENTE	Tiempo	Tiempo de duración de las pruebas.	Días
	Temperatura	Temperatura que se fijará para las pruebas.	°C
	Concentración del medio salino	Las soluciones salinas estarán a una concentración 3.5% p/v.	% p/v

Fuente: Realizada en la presente investigación.

4.5. DISEÑO EXPERIMENTAL

Diseño factorial, teniendo 3 factores y dos niveles en cada uno para un total de $2^3=8$ experimentos con su respectiva réplica; como se muestra en la tabla 3.

Las concentraciones del inhibidor se fijaron en base a la revisión bibliográfica de los artículos relacionados con el tema; de igual manera las sales al 3.5% p/v se seleccionaron teniendo en cuenta que aproximadamente a ese porcentaje están presentes los cloruros y sulfatos de sodio en el agua de mar (Cifuentes et al, 1986).

Tabla 3: Diseño experimental

FACTOR	NOMBRE DEL FACTOR	NIVELES	SIMBOLOGÍA
A	Concentración del inhibidor	5%	+
		10%	-
B	Metal	Aluminio	+
		Acero al carbono	-
C	Sal	Cloruro de sodio (NaCl)	+
		Sulfato de sodio (Na ₂ SO ₄)	-

Fuente: Realizada para la presente investigación.

En la tabla 4 se observan los experimentos realizados para la prueba de pérdida de peso del acero al carbono y aluminio, en las dos soluciones salinas utilizadas y en presencia y ausencia del extracto de Neem; se seleccionó la eficiencia a la inhibición de la corrosión de los extractos, como variable respuesta para determinar sobre qué metal, con qué sal y la mejor concentración del inhibidor para lograr una mayor eficiencia a la inhibición de la corrosión

Tabla 4: Experimentos realizados.

NÚMERO DE EXPERIMENTO	FACTOR			VARIABLE RESPUESTA	
	A	B	C	Eficiencia a la inhibición de la corrosión	
				Experimento	Réplica
1	+	+	+		
2	+	+	-		
3	+	-	+		
4	+	-	-		
5	-	+	+		
6	-	+	-		
7	-	-	+		
8	-	-	-		

Fuente: Realizada para la presente investigación.

4.6. PROCEDIMIENTO

Los experimentos se llevaron a cabo en los Laboratorio de Química y Farmacia y de Ingeniería Química de la Universidad de Cartagena; a temperatura ambiente exponiendo los cupones (muestras metálicas) a las dos soluciones salinas de cloruro de sodio y sulfato de sodio ambas al 3.5% p/v, sin agitación; durante los 14 días que demoraron las pruebas de pérdida de peso sin inhibidor (blanco) y con inhibidor.

Las placas de acero al carbono presentaban las siguientes dimensiones 4x5cm con espesor de 3 mm y los de aluminio 4x5cm y espesor de 1 mm; se utilizaron los espesores mencionados debido a que son los que se encuentran disponibles comercialmente.

4.6.1. Obtención del extracto de las hojas del árbol de Neem

Para obtener el extracto inhibidor se pesaron 250 gramos de las hojas del árbol de Neem en una balanza electrónica VIBRA HT-220E y fueron sometidas a un calentamiento en baño de maría a 60 °C en un termostato WATER BATH YCW-010E con 600 mL de agua destilada como solvente hasta que el volumen se redujo a 180 mL y finalmente se filtró, el procedimiento tardó aproximadamente siete horas y se realizó en el Laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad de Cartagena

Figura 3: Obtención del extracto de Neem.



Fuente: Foto tomada para la presente investigación.

4.6.2. Caracterización de los extractos

En el laboratorio de la Facultad de Química y Farmacia de la Universidad de Cartagena se realizaron pruebas fitoquímicas para identificar la presencia o ausencia de saponinas, taninos, fenoles, grasas y aceites en los extractos inhibidores.

Teniendo en cuenta que en publicaciones anteriores la presencia de algunos o todos estos compuestos orgánicos es lo que confiere la capacidad inhibidora de la corrosión a los extractos a partir de plantas.

Los métodos utilizados para detectar la presencia de cada uno de los constituyentes fitoquímicos en los extractos de Neem fueron:

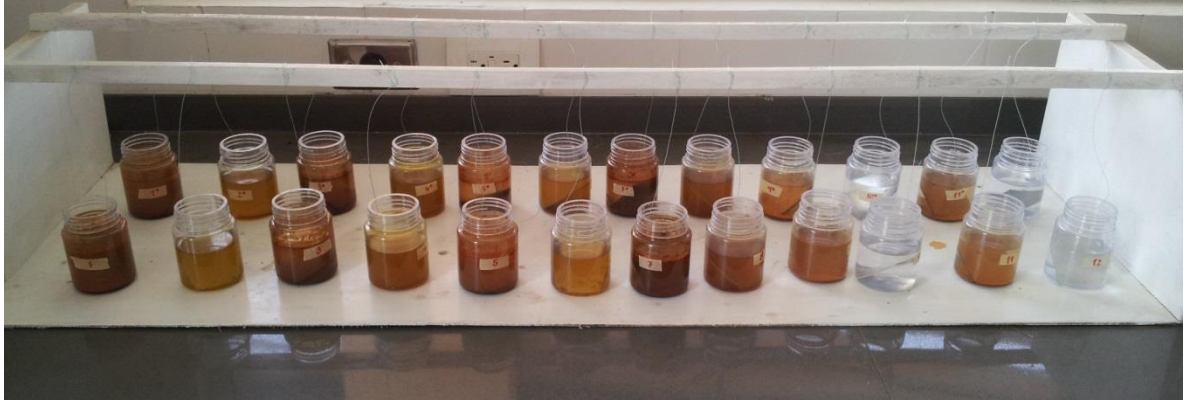
- Extracción Soxhlet para la identificación de aceites y grasas.
- Prueba de la espuma abundante para determinación de saponinas.
- Método gelatina-sal para caracterizar taninos.
- Fotocolorimetría para identificar fenoles.

4.6.3. Prueba de pérdida de peso

Este experimento se realizó en el Laboratorio del programa de Ingeniería Química de la Universidad de Cartagena, antes de la prueba se lavaron todas las placas con etanol 95% v/v para remover cualquier impureza o sucio en la superficie, posteriormente se secaron y pesaron en una balanza electrónica VIBRA HT-220E, para conocer su peso antes de que se presentara la corrosión.

Cada cupón fue introducido en un recipiente con aproximadamente 180 ml de las soluciones salinas con las dos concentraciones de extractos, la inmersión se llevó a cabo durante 14 días sin agitación. Cada día, las placas se retiraron de los recipientes, se lavaron con etanol 95% v/v, se pesaron y secaron para finalmente sumergirlas de nuevo en la correspondiente solución (Ver figura 4).

Figura 4: Montaje prueba de pérdida de peso.



Fuente: Foto tomada durante esta investigación.

4.6.4. Cálculo de la velocidad de corrosión

Los datos experimentales de pérdida de peso del metal en gramos y tiempo de inmersión en el medio corrosivo en horas, se graficaron para obtener la pendiente que corresponde a la velocidad de corrosión para cada prueba.

4.6.5. Cálculo de la eficiencia

La eficiencia de los inhibidores se define como la capacidad para inhibir la corrosión del metal y se establece en función de la velocidad de corrosión del metal sin inhibidor. Una vez se obtuvieron las velocidades de corrosión se calculó la eficiencia inhibidora (EI) del extracto de Neem utilizando la ecuación 2:

$$EI(\%) = \frac{vc - vc_{inhibidor}}{vc} \times 100 \quad (Ec. 2)$$

Donde vc , es la velocidad de corrosión sin inhibidor y $vc_{inhibidor}$ corresponde al sistema al que se le adicionó el extracto de Neem.

Otro parámetro que se tuvo en cuenta para el análisis de los resultados fue el grado de cobertura de la superficie θ , el cual representa la parte del metal cubierta por las moléculas del inhibidor y se calculó mediante la siguiente ecuación (Abiola et al, 2011):

$$\theta = \frac{EI(\%)}{100} \quad (Ec.7)$$

4.6.6. Isotermas de adsorción

El análisis de resultados de los datos obtenidos para la prueba de pérdida de peso permitió establecer que el extracto de Neem solo inhibe la corrosión sobre acero al carbono y se alcanza mayores eficiencias con cloruro de sodio como medio corrosivo.

En base a lo anterior, para determinar la interacción entre el metal y el extracto inhibidor, es decir, encontrar la Isoterma de Adsorción a la que los datos se ajustaban de una mejor manera, se realizaron seis experimentos a diferentes concentraciones del extracto (0.5 %, 1%, 3%, 5%, 7%) y uno sin inhibidor (Figura 5) sobre placas de acero al carbono y cloruro de sodio 3.5% p/v. El procedimiento utilizado fue el mismo que para la prueba de pérdida de peso con un tiempo de inmersión de 24 horas; las placas fueron retiradas, lavadas y secadas cada 12 horas.

Figura 5: Montaje prueba isotermas de adsorción.



Fuente: Foto tomada durante esta investigación.

Las cinco concentraciones utilizadas se escogieron por los resultados de la prueba de pérdida de peso, que permitieron concluir que a la concentración de 10% el extracto de Neem no funcionaba como inhibidor de la corrosión, por lo cual con el fin de determinar cuál es la máxima concentración a la que el extracto aun funciona como inhibidor se seleccionó una inferior a esta.

Además, se evaluaron concentraciones inferiores al 5% para establecer la concentración mínima a la que el extracto funciona como inhibidor del proceso corrosivo.

5. RESULTADOS: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

5.1. CARACTERIZACIÓN FITOQUÍMICA DEL EXTRACTO

En la siguiente tabla se observan los resultados de la caracterización fitoquímica del extracto de Neem (*Azadirachta Indica*):

Tabla 5: Constituyentes fitoquímicos del extracto de Neem

COMPONENTE	RESULTADO
Aceites y grasas	No detectable
Saponinas	No detectable
Taninos	0.143 %
Fenoles	0.08 %

Fuente: Berrocal, Altamiranda. 2013

Los taninos y fenoles son compuestos orgánicos con fórmulas moleculares $C_{14}H_{14}O_{11}$ y C_6H_6O respectivamente, que gracias a sus átomos de oxígeno son adsorbidos sobre la superficie del metal formando complejos que actúan como una capa protectora, disminuyendo el área de contacto entre el metal y el medio corrosivo y por consiguiente la velocidad de corrosión.

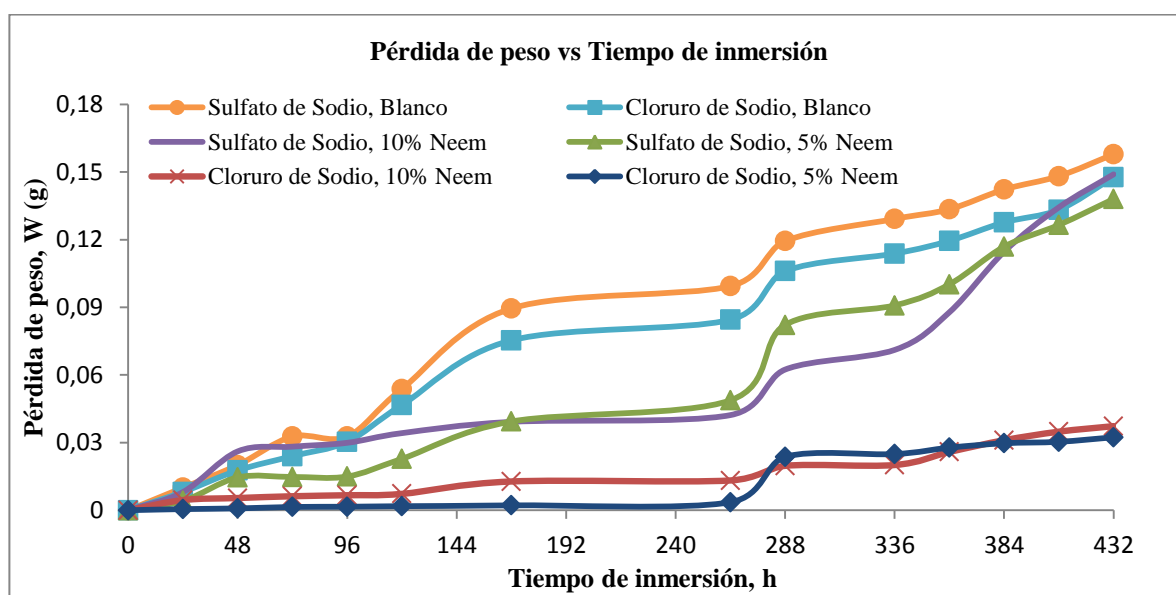
La presencia de grupos OH en los taninos y fenoles les confirió la capacidad de formar quelatos y sales con iones férricos y otros cationes metálicos (Silveira et al, 2012; Nahl' e et al, 2010); los complejos formados causaron la obstrucción de micro-ánodos, que se generan en la superficie del metal cuando entran en contacto con un electrolito o medio corrosivo, por lo tanto, permitieron retardar la disolución del metal (Amitha & Bhatthi, 2012).

5.2. PRUEBA DE PÉRDIDA DE PESO

El estudio de pérdida de peso se efectuó para evaluar la eficiencia de inhibición de la corrosión de los extractos del árbol de Neem (*Azadirachta Indica*), mediante el cálculo de la velocidad de corrosión al variar la concentración del inhibidor (5 y 10%), el medio corrosivo (sulfato y cloruro de sodio) y el metal expuesto a este (acero al carbono y aluminio). Se realizó una réplica del experimento para verificar los datos obtenidos y calcular una estimación más precisa del efecto de cada factor en el estudio.

En la siguiente figura se presentan las curvas de pérdida de peso de acero al carbono vs tiempo de inmersión de las placas en presencia y ausencia (blanco) del extracto inhibidor.

Figura 6: Curvas de Pérdida de Peso vs Tiempo de inmersión para el acero al carbono en cloruro de sodio y sulfato de sodio, en presencia y ausencia de extracto de Neem a diferentes concentraciones y 25°C.



Fuente: Realizada en esta investigación.

Las curvas de la figura 6 (Promedio de los datos de experimento y réplica para el acero al carbono) revelaron que la pérdida de peso de las placas de acero al carbono aumenta con el tiempo de inmersión a lo largo de un período de 432 horas, y es mayor en la solución de sulfato de sodio que en cloruro de sodio; porque este se comportó como electrolito debido a que tiene una alta capacidad de disociación, es decir de dividirse en sus iones posibilitando

así la conducción de la corriente eléctrica del ánodo al cátodo y luego vuelve al ánodo a través del metal, completando así el proceso.

Cuando inició la corrosión, el lugar donde el acero se corroe es en el ánodo, lo cual produjo una disolución del hierro que libera electrones, que se consumieron en el cátodo en una reducción de oxígeno, que se difundió disuelto en el agua de la solución dando lugar a la formación de iones hidroxilo que luego son transportados al ánodo a través del electrolito para combinarse con los cationes y formar hidróxido de hierro soluble (Ávila & Genescá, 1989).

Así, al sumergir las placas de acero al carbono en la solución de cloruro de sodio, se liberó hierro, el cual tiene una mayor tendencia y afinidad a reaccionar con los taninos presentes en el extracto, que con el ion cloruro, por ello se producen quelatos que actúan como una capa protectora del metal. Por el contrario, para el caso de la solución de sulfato de sodio, el hierro liberado es más afín con el ion sulfato por tanto los taninos quedan sin reaccionar y se degradan por lo cual actúan como electrolito aumentando la pérdida de peso del metal y por ende la velocidad de corrosión (Contreras et al, 2005) (Ver Figuras 6).

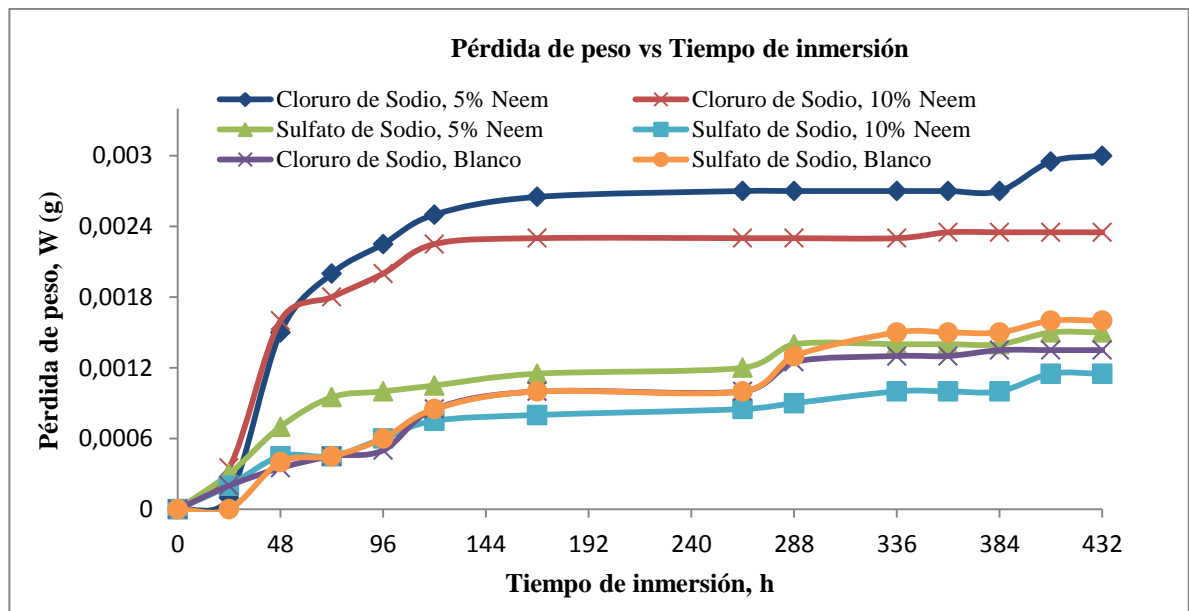
De igual manera, la pérdida de peso aumentó con la concentración del extracto inhibidor lo cual indicó que para la concentración utilizada de 10% el extracto ha perdido su capacidad inhibidora debido a que acelera el proceso corrosivo sobre el metal por lo cual se obtuvieron mayores velocidades de corrosión que cuando se evaluó la concentración del 5%; para el caso del acero al carbono de 0,0000859 g/h con una concentración de extracto inhibidor del 10% frente a 0,0000747 g/h para el 5%; y en las placas de aluminio los valores fueron de 0,0003440 g/h y 0,0003188 g/h, respectivamente.

Se observó además, que las curvas de pérdida de peso para los experimentos en blanco (ausencia de extracto) tienen una mayor pendiente que las curvas de solución de sulfato de sodio y a su vez que las de cloruro de sodio, lo que significa que el inhibidor funcionó en ambas soluciones siendo más visible el efecto inhibidor en cloruro de sodio al retardar el proceso de corrosión durante el ensayo y la réplica; esta disminución de la pendiente en la

pérdida de peso del metal, indica que las moléculas de los extractos fueron adsorbidas sobre la superficie del metal y luego inhibieron el proceso de corrosión (El-Etre, 2003).

En la siguiente figura se presentan las curvas de pérdida de peso de aluminio vs tiempo de inmersión de las placas en presencia y ausencia (blanco) del extracto inhibidor.

Figura 7: Curvas de Pérdida de Peso vs Tiempo de inmersión para el aluminio en cloruro de sodio y sulfato de sodio, en presencia y ausencia de extracto de Neem a diferentes concentraciones y 25°C.



Fuente: Realizada en esta investigación.

Una inspección de las curvas de pérdida de peso de la Figura 7 (Promedio de los datos de experimento y réplica para el aluminio) realizadas a partir de los datos experimentales, reveló que la pérdida de peso aumentó a lo largo de las 432 horas que duraron los experimentos y es mayor para las placas sumergidas en cloruro de sodio 3.5% p/v que para las pruebas en blanco y en presencia de sulfato de sodio, porque cuando las placas entran en contacto con el sulfato de sodio; el aluminio mediante una reacción anódica a partir de la cual se desarrolló la corrosión, se ioniza y queda cargado con un exceso de cargas positivas lo que le permite conducir más energía y reaccionar más rápido con los taninos del extracto formando quelatos y una capa protectora que disminuye el área de contacto entre el medio corrosivo y el metal, a su vez contribuyó a reducir la pérdida de peso como se observa en la figura 7 (Dan et al, 2012; Ávila & Genescá, 1987).

Para el caso del cloruro de sodio con aluminio, el ion aluminio reaccionó con la sal y formó una capa de cloruro de aluminio u oxiclорuro de aluminio pero después de un tiempo este se hidrolizó formando hidróxido de aluminio y ocasionó una disminución en el pH de la solución pasando de pH básico a pH ácido, favoreciendo la presencia de iones hidronio por tanto la velocidad de corrosión aumentó (Balbo et al, 2013).

Por lo anterior, la velocidad de corrosión es la pendiente de cada una de las curvas (Anexo B) , con estos valores se calculó la eficiencia en la inhibición de la corrosión utilizando la Ecuación 2; y el grado de recubrimiento del metal con la Ecuación 3.

Los datos obtenidos se tabulan a continuación.

Tabla 6: Comparativo de eficiencias de inhibición del extracto de Neem sobre Acero al carbono y aluminio.

		Acero al carbono		Aluminio	
Medio corrosivo	Concentración del extracto	Eficiencia Inhibidora (%)	Grado de recubrimiento	Eficiencia Inhibidora (%)	Grado de recubrimiento
Cloruro de sodio	5 %	78,076	0,780776	-121,2733	-1,212733
	10 %	74,788	0,74788	-72,6708	-0,726708
Sulfato de sodio	5 %	13,626	0,13626	6,6754	0,066754
	10 %	6,804	0,06804	28,3377	0,283377

Fuente: Realizada en esta investigación.

El extracto de Neem presentó mayores eficiencias de inhibición de la corrosión sobre placas de acero al carbono que de aluminio, porque los iones férricos y ferrosos que libera el acero reaccionan con los taninos del extracto y se forman quelatos bastante estables que actúan como una capa protectora que impidió el contacto entre el electrolito y el metal, evitando entonces que el hierro se siga solubilizando; como se observa en la tabla 6 las eficiencias en la inhibición de la corrosión (EI) para el acero al carbono evaluado en cloruro de sodio son bastante altas con un porcentaje máximo de 78,076% y por el contrario para el sulfato de sodio las eficiencias no superan el 13,626% debido a que en la solución de cloruro de sodio, el hierro del acero al carbono reaccionó con los taninos creando una capa protectora, pero al sumergir las placas en sulfato de sodio, el hierro reaccionó con el ion

sulfato y los taninos no reaccionaron porque se comportan como electrolitos aumentando la velocidad de corrosión y disminuyendo considerablemente la eficiencia.

A diferencia del acero al carbono que presentó una corrosión homogénea, en el aluminio se desarrolló una actividad corrosiva denominada pitting que se define como la disolución localizada y acelerada de un metal; se produjo porque el aluminio es un metal autopasivante, es decir, crea de manera espontánea una película pasivada de óxido de aluminio la cual inicialmente reduce la velocidad de corrosión, pero al transcurrir algún tiempo y por presencia de los iones cloruro y sulfato, la película sufrió rupturas localizadas, lo que aceleró la disolución del metal y la velocidad de corrosión, por ello se puede observar en la tabla 6 que de los resultados obtenidos para el aluminio, el extracto inhibidor no es eficiente al ser evaluado en aluminio.

5.3. ANÁLISIS DE VARIANZA ANOVA

Los factores y corridas del diseño experimental se observan en la siguiente tabla:

Tabla 7: Diseño experimental para análisis de varianza ANOVA.

Prueba	FACTORES			VARIABLE RESPUESTA
	Concentración inhibidor	Metal	Sal	Eficiencia de inhibición (%)
1	5 %	Aluminio	NaCl	-121,2733
2	5 %	Aluminio	Na ₂ SO ₄	6,6754
3	5 %	Acero al carbono	NaCl	78,076
4	5 %	Acero al carbono	Na ₂ SO ₄	13,626
5	10 %	Aluminio	NaCl	-72,6708
6	10 %	Aluminio	Na ₂ SO ₄	28,3377
7	10 %	Acero al carbono	NaCl	74,788
8	10 %	Acero al carbono	Na ₂ SO ₄	6,804

Fuente: Realizada en esta investigación.

Inicialmente se estableció una hipótesis nula donde los factores estudiados no tienen una incidencia significativa sobre las eficiencias de inhibición. Mediante el análisis de varianza ANOVA realizado en el programa Statgraphics se determinó que los factores tipo de Metal, tipo de sal y la interacción entre estos, tuvieron una incidencia significativa sobre la variable de respuesta, ya que tienen un valor-P menor a 0,005 (Tabla 10), esto se verificó

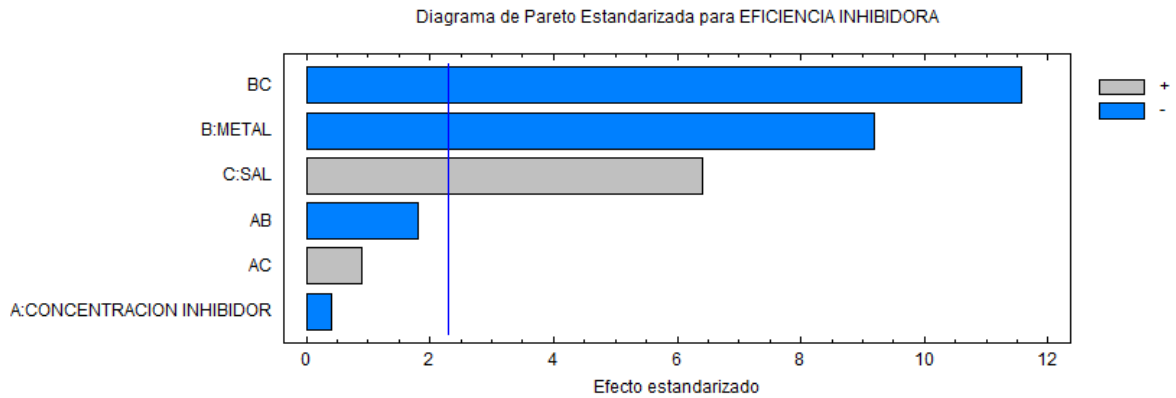
también con el diagrama de Pareto estandarizado (Figura 10) para la eficiencia inhibidora de la corrosión.

Tabla 8: Análisis de Varianza para la eficiencia inhibidora.

FUENTE	VALOR-P
A:CONCENTRACION INHIBIDOR	0,7014
B:METAL	0,0000
C: SAL	0,0002
AB	0,1088
AC	0,3913
BC	0,0000

Fuente: Realizada en esta investigación.

Figura 8: Diagrama de Pareto estandarizado para la eficiencia de inhibición de la corrosión.



Fuente: Realizada en esta investigación.

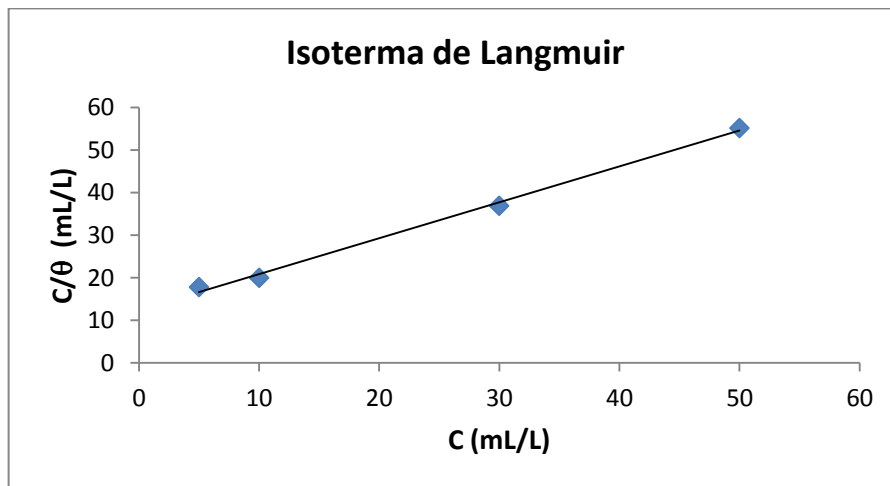
El diagrama de Pareto permitió concluir que el metal (-) y la sal (+), acero al carbono y cloruro de sodio, son los factores que tuvieron más incidencia en la variable de respuesta y con las cuales teóricamente se deben alcanzar mayores eficiencias inhibidoras de la corrosión; lo cual se cumplió debido a que los máximos valores alcanzados fueron de 78,076% y 74,788% al evaluar el extracto sobre placas de acero al carbono y con cloruro de sodio como medio corrosivo (Tabla 8).

5.4. ISOTERMA DE ADSORCIÓN

Los datos obtenidos de las pruebas de isoterma de adsorción a 25°C para el acero al carbono en cloruro de sodio (Anexo C) presentaron un ajuste a la isoterma de Langmuir, permitiendo conocer la interacción que se presentó entre el extracto inhibidor y el metal (acero al carbono), es decir, la manera como el inhibidor es adsorbido en la superficie del acero, mediante el cálculo de la energía libre de Gibbs (Touir et al, 2008).

Al graficar la relación entre la concentración del inhibidor y la superficie cubierta vs la concentración del inhibidor, se obtuvo la figura 11, que presentó un ajuste bastante cercano a una línea recta ($R^2=0.9967$), que se correlacionó con el comportamiento de la isoterma de Langmuir.

Figura 9: Isoterma de adsorción de Langmuir. (C/θ v C).



Fuente: Realizada en esta investigación.

La ecuación para la isoterma de Langmuir, en función de los parámetros estudiados es (Touir et al, 2008):

$$\frac{C}{\theta} = \frac{1}{K} + C \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde:

C: Concentración del extracto inhibidor (mL/L)

θ : Superficie cubierta.

K: Constante de adsorción (L/mL).

Al comparar con la ecuación de la línea recta:

$$y = mx + b$$

Y con la ecuación resultante de la regresión de los datos de la figura 11

$$y = 0.8439x + 12.425$$

Donde $1/K$ es el intercepto con el eje “y”, entonces la constante de adsorción es:

$$\frac{1}{K} = 12.425$$

$$K = 0.0804829 \frac{L}{mL}$$

Mediante la siguiente ecuación se calculó la energía libre de Gibbs (Quartarone et al, 2012):

$$\Delta G = -RT \ln[K \cdot C_{AP}] \quad (Ec. 9)$$

Donde:

R: Constante universal de los gases (J/mol K).

T: Temperatura ambiente.

K: Constante de adsorción (L/mL).

C_{AP} : Concentración del agua pura la cual equivale a 1000mL/L o 1000g/L o 55.55mol/L.

$$\Delta G = -\left(8.314 \frac{J}{mol \cdot K}\right) (298 K) \ln\left[0.0804829 \frac{L}{mL} \cdot 1000 \frac{mL}{L}\right] = -10871.6967 \frac{J}{mol}$$

$$\Delta G = -10.87 \frac{KJ}{mol}$$

En general, la adsorción de inhibidores de corrosión sobre metales puede prevenir las reacciones anódicas, catódicas o ambas responsables de la pila que origina corrosión. Este proceso puede ser físico, químico o una combinación de ambos; la principal diferencia radica en que la fisorción definida como una atracción electrostática entre el inhibidor y el metal se encargó de retardar las reacciones anódicas y las catódicas y la quimisorción es

más compleja y depende de la reactividad entre adsorbato y adsorbente, es necesaria una energía de activación y garantizar una temperatura superior a la de ebullición del adsorbente; una vez se logran estos requerimientos, la adsorción química es responsable de despolarizar los agentes corrosivos y las moléculas de agua adsorbidas al metal.

De acuerdo a estudios realizados utilizando diferentes extractos vegetales como inhibidores de corrosión evaluados sobre metales se estableció, que valores negativos para la Energía Libre de Gibbs hasta -20 kJ/mol corresponden al mecanismo de fisisorción e indican la espontaneidad del proceso, valores de -40 kJ/mol o más negativos son coherentes con quimisorción (Quartarone et al, 2012).

En las investigaciones, al determinar el mecanismo de adsorción metal-extracto se ha encontrado que la mayoría de las interacciones que se presentan son por fisisorción; en primer lugar, el extracto de *Euphorbia falcata* fue evaluado en placas de acero al carbono en medio ácido obteniéndose altas eficiencias en la inhibición de la corrosión al aumentar la concentración de extracto, los datos experimentales se ajustaron a la isoterma de adsorción de Langmuir y al calcular la energía libre de Gibbs se obtuvo un valor de $-23.92 \text{ kJ mol}^{-1}$ lo cual indicó una adsorción física (Bribria et al, 2013) , de igual manera, Lia y colaboradores (2012) alcanzaron valores similares de $-20.1 \text{ kJ mol}^{-1}$ y $-19.9 \text{ kJ mol}^{-1}$ para 45 y $25 \text{ }^\circ\text{C}$ respectivamente al estudiar por polarización potencio-dinámica, espectroscopia de impedancia electroquímica, microscopía de fuerza atómica, espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier y cálculos de química cuántica la capacidad de inhibición de la corrosión de las hojas del árbol *Osmanthus fragans* sobre acero al carbono en ácido Clorhídrico 1M.

El extracto de *Mimosa* fue utilizado para la obtención de un inhibidor de corrosión sobre cobre-MM55, se lograron porcentajes altos de inhibición y directamente proporcionales con la concentración del inhibidor debido a la adsorción de las moléculas del inhibidor sobre la superficie del metal, as mismo, se estableció que la adsorción obedece a la isoterma de Temkin y al calcular la energía libre de Gibbs el resultado fue de $-6.0138 \text{ kJ mol}^{-1}$,

recordando que valores negativos hasta -20kJ mol^{-1} indican que el mecanismo de adsorción es de fisisorción (Gerengia et al, 2012).

Finalmente, Hussin & Kassim (2011) estudiaron la capacidad de inhibición de la corrosión y el comportamiento de adsorción de la *Uncaria gambir* sobre acero al carbono en ácido clorhídrico mediante pruebas de pérdida de peso, polarización potencio-dinámicas y espectroscopia de impedancia electroquímica, la linealidad de la isoterma de Langmuir indica la formación de monocapas del inhibidor en la superficie del metal y para conocer el mecanismo de adsorción del inhibidor sobre el metal, se utilizó la fórmula de Arrhenius, donde la energía libre de Gibbs alcanzó un valor de $-21.957\text{kJ mol}^{-1}$.

En base a lo anterior y a el valor calculado para la Energía libre de Gibbs de -10.87 kJ/mol se concluyó que el mecanismo de adsorción del presente estudio corresponde a adsorción física o fisisorción lo que implicó la rápida interacción entre adsorbente y adsorbato, pero se elimina fácilmente de la superficie con el aumento de la temperatura debido a que las moléculas del inhibidor se mantienen unidas a la superficie del metal por medio de fuerzas de Van der Waals, las cuales son relativamente débiles al compararlas con enlaces químicos covalentes e iónicos (Condon, 2006); esto indicó que el extracto inhibidor de Neem fue adsorbido espontáneamente en la superficie del acero al carbono y aunque teóricamente esta interacción es débil, permitió retardar el proceso corrosivo alcanzando buenas eficiencias en la inhibición de la corrosión sobre acero al carbono en cloruro de sodio (Anexo C).

Además de identificar que la fisisorción es el mecanismo de adsorción que ocurre en la superficie del metal, los experimentos realizados permitieron establecer la máxima y óptima concentración con la que se alcanzaron los mayores valores de eficiencia inhibidora de la corrosión. Los resultados de la prueba de pérdida de peso permitieron concluir que de las concentraciones del extracto utilizadas inicialmente (5 y 10%), se logró una máxima eficiencia inhibidora del 78,076% a menor concentración y al aumentar esta, se aceleró el proceso corrosivo debido a que ocurrió lo mismo con la velocidad de corrosión, esto conlleva a una menor eficiencia (74,788%); por lo cual en este punto se evaluó un rango

más amplio de concentraciones de extracto (0.5, 1, 3, 5 y 7%) para establecer desde y hasta que concentración es viable utilizar el inhibidor obtenido de las hojas del árbol de Neem.

En la tabla 11 se observan las velocidades de corrosión y la eficiencia inhibidora para cada una de las concentraciones mencionadas, los resultados indicaron claramente que la menor velocidad de corrosión y mayor eficiencia inhibidora se logró con una concentración del 5% v/v. De igual manera, a medida que disminuye la concentración sucede lo mismo con la eficiencia. El extracto inhibidor tiene una máxima concentración permisible a utilizar del 5% por lo cual al usar valores superiores, se da un aumento en la velocidad de corrosión y este pierde su capacidad inhibidora (Pinder & Gray, 2008).

Tabla 9: Velocidad de corrosión, eficiencia de inhibición del Acero al Carbono en cloruro de sodio a diferentes concentraciones de extracto inhibidor, durante 24 horas de exposición.

CONCENTRACIÓN EXTRACTO	VELOCIDAD DE CORROSIÓN (g/h)	EFICIENCIA INHIBIDORA (%)
7%	0,00019583	-46,875
5%	0,0000125	90,625
3%	0,0000250	81,25
1%	0,0000667	50
0.5%	0,0000958	28,125
Blanco	0,0001333	-

Fuente: Realizada en esta investigación.

6. CONCLUSIONES

La caracterización de los extractos del árbol de Neem permitió gracias al análisis fitoquímico establecer que de los cuatro componentes orgánicos que se presumía contenía el extracto: saponinas, taninos, fenoles, aceites y grasas; solo están presentes los taninos y fenoles, a los cuales se les confiere la capacidad inhibidora sobre la corrosión de los metales, debido a que al ser adsorbidos en la superficie de estos actúan como una capa protectora, disminuyendo el área de contacto entre el metal y el medio corrosivo y por consiguiente la velocidad de corrosión.

Al calcular la velocidad de corrosión en los experimentos, se encontró que el máximo valor (0,0003691 g/h) corresponde a la prueba realizada sin inhibidor (blanco), seguida de la velocidad para las placas en contacto con sulfato de sodio y cloruro de sodio, 0,0003188 y 0,0000859 g/h, respectivamente; de lo cual se puede concluir que el extracto inhibidor si funcionó debido a que se logró una disminución significativa en las velocidades de corrosión para todos los casos estudiados.

En el análisis de pérdida de peso se alcanzó una máxima eficiencia de la inhibición de la corrosión del acero al carbono en cloruro de sodio del 78,076% porque el hierro reacciona con los taninos creando una capa protectora que retrasa el proceso corrosivo.

Al evaluar la inhibición de la corrosión del acero al carbono en sulfato de sodio se obtuvo una menor eficiencia (6,804%) porque el hierro reacciona con el ion sulfato y los taninos no reaccionan, sino que se comportan como electrolitos aumentando la velocidad de corrosión y disminuyendo considerablemente la eficiencia.

El extracto de Neem no funciona como inhibidor de la corrosión en las placas de aluminio debido a que este metal presenta corrosión por pitting formando una película protectora bastante débil, que al entrar en contacto con iones cloruro y sulfato de los medios corrosivos utilizados sufre rupturas localizadas, acelerando la disolución del metal y la velocidad de corrosión.

El análisis de varianza ANOVA corrobora los resultados de la prueba de pérdida de peso, en el diagrama de Pareto se evidencian que los factores con mayor incidencia sobre la variable de respuesta, es decir, la eficiencia inhibidora de la corrosión corresponden a el extracto inhibidor evaluado en acero al carbono y cloruro de sodio.

Mediante el ajuste a la isoterma de adsorción de Langmuir se calculó un valor para la Energía Libre de Gibbs de -10.87 kJ/mol, el cual corresponde a fisisorción o adsorción física, lo que implicó la rápida interacción entre adsorbente y adsorbato, es decir, el extracto inhibidor de Neem fue adsorbido espontáneamente en la superficie del acero al carbono y se retardó el proceso corrosivo lo que permitió alcanzar buenas eficiencias de inhibición en el rango de 50 a 90% en las placas de metal sumergidas en cloruro de sodio.

Las pruebas para determinar el mecanismo de adsorción se realizaron con un amplio rango de concentraciones, lo que permite concluir que la mejor concentración a la cual utilizar el extracto inhibidor es del 5% v/donde se alcanzó la menor velocidad de corrosión (**0,0000125 g/h**) y por consiguiente el mayor valor de eficiencia inhibidora de 90,625%.

Los datos de prueba de pérdida de peso e isoterma de adsorción permiten concluir que la máxima concentración a la debe utilizarse el extracto de Neem es del 5% para garantizar altos valores de eficiencia inhibidora, por lo cual para todos los experimentos realizados a concentraciones superiores, 7 y 10%, se obtuvieron porcentajes considerablemente bajos de eficiencia de -46,875% y -72,6708%, respectivamente.

La concentración del extracto y la eficiencia en la inhibición de la corrosión presentaron un comportamiento directamente proporcional en las pruebas de adsorción, lo cual concuerda con la bibliografía revisada debido a que a mayor concentración aumenta la superficie del metal recubierta por el inhibidor por el incremento del número de moléculas de extracto adsorbidas en la superficie metálica.

En la prueba de pérdida de peso y de isoterma de adsorción, la velocidad de corrosión de los blancos (ausencia de inhibidor) fue mayor que la de las placas sumergidas en solución de extractos de Neem, esto indica que el extracto actuó como inhibidor de corrosión protegiendo la superficie del metal del ataque de los iones sulfato y cloruro y disminuyendo la velocidad de corrosión.

La principal limitación fue la falta de recursos físicos, lo cual impidió realizar un análisis cromatográfico al extracto obtenido para conocer específicamente que taninos y fenoles están presentes y así establecer cuáles son los complejos que se forman en la superficie del metal que le brindan protección.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo de grado son punto de partida para futuras investigaciones en el Semillero de Corrosión del programa de Ingeniería Química de la Universidad de Cartagena para la obtención de inhibidores de corrosión de origen vegetal, el uso de estos como pinturas o aditivos.

7. RECOMENDACIONES

Se recomienda para estudios similares realizar pruebas termométricas que permitan establecer la influencia de la variación de la temperatura en la inhibición de la corrosión de extractos de origen vegetal.

Obtener el extracto inhibidor de otras partes del árbol de Neem, como el tallo, los frutos, las flores para el máximo aprovechamiento de este recurso de origen vegetal y para determinar en qué caso se alcanzan mayores eficiencias en la inhibición de la corrosión.

Efectuar ensayos para determinar la estabilidad del extracto de las hojas del árbol de Neem con el fin de evaluar su uso a largo plazo a nivel industrial.

Realizar el estudio de factibilidad económica, para conocer qué tan rentable y viable es la producción a nivel industrial de este inhibidor de la corrosión obtenido a partir del árbol de Neem.

Se recomienda, continuar investigando métodos para la obtención de un inhibidor vegetal a nivel industrial a partir del extracto de Neem.

REFERENCIAS

Abiola, O., Odin, E., Olowoyo, D., Adeloye, T. (2011). *Gossipium hirsutum* l. Extract as green corrosion inhibitor for Aluminum in HCl solution. Bulletin of the Chemical Society of Ethiopia, Vol 45, pp. 475-480.c

Agouborde, L. (2008). Remoción de metales pesados por medio de adsorbentes no convencionales. Tesis para optar al grado académico de Magíster en Ciencias de Recursos Naturales. Universidad de la Frontera, Chile. pp. 14-16. Ahmad, Z. (2006). Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control, Chapter 1, pp. 1-8.

Ahmad, S. (2003). Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction—a review. Cement and Concrete Composites, Vol 25, pp 459–471.

Amitha, B. & Bharathi J. (2012) Green Inhibitors for Corrosion Protection of Metals and Alloys: An Overview. *International Journal of Corrosion* (2012): 1-15.

Ávila, J., Genescá, J. (1987). Más allá de la herrumbre I, Primera edición, pp. 50-85.

Ávila, J., Genescá, J. (1989). Más allá de la herrumbre II: La lucha contra la corrosión. Fondo de cultura económica, Primera edición, pp. 24-30.

Balbo, A., Frignani, A., Grassi, V., Zucchi, F. (2013). Corrosion inhibition by anionic surfactants of AA2198 Li-containing aluminium alloy in chloride solutions. Corrosion Science, vol. 73, pp. 80-88.

Berrocal, M., Altamiranda, E. (2013). Estudio de la eficiencia de inhibidores de corrosión a partir de extractos vegetales.

Bilurbina, L., Liesa, F., Iribarren J. (2003). *Corrosión y Protección*. Editorial UPC, pp. 22-23,136-137, 141-144.

Bribria, A., Tabyaouia, M., Tabyaouia, B., Attaric, H., Bentiss, F. (2013). The use of *Euphorbia falcata* extract as eco-friendly corrosion inhibitor of carbon steel in hydrochloric acid solution. *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 141, pp. 240-247

Callister, W. (1996). *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. Editorial Reverte, pp. 594-595.

Cardona, N., Salazar, M. (2012). ACTIVIDAD alelopática y antibacteriana de fracciones polares F1-C, F1-D Y F1-F obtenidas de *Henriettella trachyphylla* Triana (Melastomataceae). Trabajo de grado para optar al título de Tecnólogo Químico. Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia; pp. 46-48.

Celaya, J. (1998). Evaluación de la capacidad de biosorción de Zn^{+2} por thiobacillus ferrooxidans. Editorial Universidad de Sonora. División de Ingeniería, pp. 25-27.

Cifuentes, J., Torres, M., Frías, M. (1986). El océano y sus recursos. II. Las ciencias del mar: oceanografía geológica y oceanografía química. Editorial Fondo de Cultura Económica, pp. 61-63

Coatl, M. (2009). Estudio de velocidad de corrosión de acero al carbono en soluciones acuosas de alcanolaminas y sales térmicamente estables. Tesis para obtener el título de Licenciatura en Ingeniería Química. Universidad de las Américas Puebla. Anexo IV: Constantes K para diferentes unidades de velocidad de Corrosión.

Comisión Regional de Competitividad de Cartagena y Bolívar. (2010). Plan Regional de Competitividad Cartagena y Bolívar 2008–2032. Primera versión.

Condon, J. (2006). Surface Area and Porosity Determinations by Physisorption: Measurements and Theory. Elsevier, First Edition, pp. 2-10.

Contreras, M., Marnet, N., Perraud, I., Roussos, S., Guyot, S., Augur, C. (2005). Degradación inicial de taninos condensados por *Aspergillus fumigatus* MC8. XI Congreso Nacional de biotecnología y bioingeniería.

Dan, Z., Mutob, I., Harab, N. (2012). Effects of environmental factors on atmospheric corrosion of aluminium and its alloys under constant dew point conditions. *Corrosion Science*, vol. 57, pp. 22-29

DeGarmo, E., Black, E., Kohser, R. (2002). *Materiales y procesos de fabricación*. Editorial Reverte. Vol I, pp. 223-224.

Deng, S., Li, X. (2012). Inhibition by *Jasminum nudiflorum* Lindl. leaves extract of the corrosion of aluminium in HCl solution. *Corrosion Science*, Vol. 64, pp. 253-262.

El-Etre, A.Y., Abdallah, M. (2000). Natural honey as corrosion inhibitor for metals and alloys. II. C-steel in high saline water. *Corrosion Science*, Vol. 42, pp. 731-733.

El-Etre, A.Y. (1998). Natural honey as corrosion inhibitor for metals and alloys. i. copper in neutral aqueous solution. *Corrosion Science*, Vol. 40, p. 1845.

El-Etre, A.Y. (2003). Inhibition of aluminum corrosion using *Opuntia* extract. *Corrosion Science*. Vol. 45, pp. 2485–2495.

El-Etre, A.Y. (2006). Khillah extract as inhibitor for acid corrosion of SX 316 steel. *Applied surface Science*, Vol. 256, pp. 8521-8525.

Gerengia, H., Schaeferb, K., Sahinc, H. I. (2012). Corrosion-inhibiting effect of Mimosa extract on brass-MM55 corrosion in 0.5 M H₂SO₄ acidic media. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 18, pp. 2204-2210.

Godínez, L., Meas, Y., Ortega-Borges, R., Corona, A. (2003). Los inhibidores de corrosión. *Revista de Metalurgia*, Vol. 39, No 2, pp. 140-158.

Gómez, D., De la Cruz, Y., Alcudia, J., Velásquez, J., Cerino, E. (2011). Elaboración y uso de bio repelente a base de Hojas de Neem (*Azadirachta indica*) En el ejido Morelos piedra 3ª secc. Cunduacán, tabasco. *Revista de Divulgación de Química y Biología*, Vol. 3, pp. 62-63.

Gómez De León, F.C. (2004). *Manual Básico de Corrosión para Ingenieros*. Ediciones de la Universidad de Murcia, Primera Edición.

Gudze, M., Melchers, R. (2008). Operational based corrosion analysis in naval ships. *Corrosion Science*, Vol. 50, pp. 3296–3307.

Hernández, J.S. (2002). Monitoreo de la protección catódica a línea submarina No. 131 de 36” Rebombao/Dos Bocas de la región Marina Suroeste en la sonda de Campeche. Tesis maestría Gerencia de proyecto de ductos. Departamento de Ingeniería Química y Alimentos, Escuela de Ingeniería, Universidad de las Américas Puebla, México.

Hussin, M. H., Kassim, M. J. (2011). The corrosion inhibition and adsorption behavior of Uncaria gambir extract on mild steel in 1 M HCl. *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 125, pp. 461-468.

Huu, N. (2004). The inhibition of copper corrosion in aqueous environments heterocyclic compounds. Tesis de doctorado. Universidad Tecnológica de Queensland.

Kalpakjian, S., Schmid, S., Figueroa, U. (2002). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Editorial Pearson Educación de México, S.A de C.V. Cuarta edición, pp. 146.

Kumar, S., Arora, S., Sharma, M., Arora, P., Mathur, S.P. (2009). Synergistic effect of *Calotropis* plant in controlling corrosion of mild steel in basic solution. *Journal of the Chilean Chemical Society*, Vol 54, pp. 83-88.

Lia, L., Zhanga, X., Leia, J., Hea, J., Zhanga, S., Panb, F. (2012). Adsorption and corrosion inhibition of *Osmanthus fragran* leaves extract on carbon steel. *Corrosion Science*, Vol. 63, pp. 82-90.

López, G. (2006). Los árboles y arbustos de la península Ibérica e Islas Balerares. Segunda edición. Mundi-Prensa libros, S.A. pp. 1104.

Lozano, M., Ticona, E., Carrasco, C., Flores, Y., Almanza, G. (2012). Cuantificación de saponinas en residuos de quinua real *Chenopodium quinoa* willd. *Revista Boliviana de Química*, Vol. 29, No. 2, pp. 128-135.

Luque de Castro, M.D., Priego-Capote, F. (2010). Soxhlet extraction: Past and present panacea. *Journal of Chromatography A*, Vol. 1217, pp. 2383–2389.

Nahl'e, A., Abu-Abdoun, I., Abdel-Rahman, I., Al-Khayat, M. (2010). UAE Neem Extract as a Corrosion Inhibitor for Carbon Steel in HCl Solution. *International Journal of Corrosion*, Vol. 2010, pp. 1-9.

Oguzie, E. (2007). Corrosion inhibition of aluminium in acidic and alkaline media by *Sansevieria trifasciata* extract. *Corrosion Science*. Vol. 49, pp. 1527–1539.

Okafor, P.C., Ebenso, E.E., Udofot, J.E. (2010). *Azadirachta Indica* Extracts as Corrosion Inhibitor for Mild Steel in Acid Medium. *International Journal of Electrochemical Science*, Vol. 5, pp. 978 – 993.

Okafor, P.C., Ikpi, M.E., Ebemso, E.E., Ekpe, U.J., Umoren, S.A. (2008). Inhibitory action of *Phyllanthus amarus* extracts on the corrosion of mild steel in acidic media. *Corrosion Science*, Vol. 50, pp. 2310-2317.

Orubite, K.O, Oforka, N.C. (2004). Inhibition of the corrosion of mild steel in hydrochloric acid solutions by the extracts of leaves of *Nypa fruticans* Wurm. *Materials Letters*, Vol. 58, pp. 1768, 1769, 1772.

Pinder, G., Gray, W. (2008). *Essentials of Multiphase Flow in Porous Media*. John Wiley & Sons, pp. 180-186.

Ponce, E. (2005). *Diseño de un tren de potabilización para una planta generadora de agua embotellada*. Tesis para obtener el Título de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad de Puebla, México. pp. 53-56.

Quartarone, G., Ronchin, L., Vavasori, A., Tortato, C., Bonaldo, L. (2012). Inhibitive action of gramine towards corrosion of mild Steel in deaerated 1.0 M hydrochloric acid solutions. *Corrosion Science*, Vol. 64, pp. 82-89.

Quintero, D. (2013). *Evaluación de compuestos del metabolismo en seis clones de cacao de tres localidades del Estado de Miranda*. XI Congreso Venezolano de Química.

Quraishi, M.A., Faroogi, I.H., Saini, P.A. (1999). Investigation of Some Green Compounds as Corrosion and Scale Inhibitors for Cooling Systems. *Journal Corrosion*, Vol. 55, pp. 493,495, 496.

Reyes, E., Valero, S., Garay, D. (2003). Estudio preliminar de las propiedades físicas de la especie *Azadirachta indica* (neem), procedente del estado falcón (Venezuela). *Revista Forestal de Venezuela*, Vol. 47, pp. 23-24.

Satapathy, A.K., Gunasekaran, G., Sahoo, S.C., Kumar Amit, Rodrigues, P.V. (2009). Corrosion inhibition by *Justicia gendarussa* plant extract in hydrochloric acid solution. *Corrosion Science*, Vol. 51, pp. 2848–2856.

Silveira, R., Cassel, E. & Schermann, D. (2012). Black Wattle Tannin As Steel Corrosion Inhibitor. *ISRN Corrosion*, Vol. 2012, pp. 1-19.

Touri, R., Cenoui, M., Bakri, M., Touhami, M. (2008). Sodium gluconate as corrosion and scale inhibitor of ordinary steel in simulated cooling water. *Corrosion Science*, Vol 50, pp.1530-1537.

Uhlig, H.H., Revie, R.W. (2008). *Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering*. Fourth Edition. New Jersey: John Wiley & Sons.

Xianghong L., Shuduan D., Hui F. (2012). Inhibition of the corrosion of steel in HCl, H₂SO₄ solutions by bamboo leaf extract. *Corrosion Science*. Vol. 62. pp. 163–175.

ANEXOS

Anexo A. Prueba fitoquímica del extracto de Neem (*Azadirachta Indica*)



Universidad
de Cartagena
Fundada en 1827

NEEM

PARÁMETRO	RESULTADO	LIMITE DETECCION	MÉTODO
ACEITES Y GRASAS%	NO DETECTABLE	0.10	EXTRACCION SOXHLCT
SAPONINAS%	NO DETECTABLE	0.10	PRUEBA DE LA ESPUMA ABUNDANTE
TANINOS%	0.143		GELATINA - SAL
FENOLES%	0.08		FOTO COLIVIMETRIA

Atentamente,

JAIRO E. MERCADO CAMARGO, Q. F.

Coordinador Laboratorio de Prestación de Servicios

LICENCIA NAL. DE FUNCIONAMIENTO DE MINSALUD No. 752 DE NOV. 24/1988.



Facultad de Ciencias Farmacéuticas
Unidad de Prestación de Servicio
Rafael Ruiz Arango
Campus de Zaragocilla, Área de la Salud
Teléfonos: 6698277
email: pserveiciofcqf@yahoo.es
web: www.unicartagena.edu.co
Cartagena de Indias, D.T. y C. - Colombia

Anexo B. Datos de prueba de pérdida de peso de las placas.

Tabla B.1: Datos Prueba de pérdida de peso para placas de acero al carbono en cloruro de sodio y sulfato de sodio, en presencia y ausencia de extracto de Neem a diferentes concentraciones y 25°C.

	TIEMPO	24 h	48 h	72 h	96 h	120 h	168 h	264 h	288 h	336 h	360 h	384 h	408 h	432 h
Medio corrosivo	Concentración	W1 (g)	W2 (g)	W3 (g)	W4 (g)	W5 (g)	W6 (g)	W7 (g)	W8 (g)	W9 (g)	W10 (g)	W11 (g)	W12 (g)	W13 (g)
NaCl	5%	0,0008	0,0011	0,0023	0,0025	0,0029	0,0035	0,0046	0,0318	0,0342	0,0399	0,0419	0,0428	0,0438
NaCl	10%	0,0034	0,0044	0,0049	0,0056	0,0059	0,0161	0,0162	0,0264	0,0264	0,036	0,0453	0,0513	0,0544
Na2SO4	5%	0,004	0,0148	0,0151	0,0154	0,0223	0,0385	0,044	0,0911	0,0991	0,1081	0,1194	0,1295	0,1384
Na2SO4	10%	0,0086	0,0254	0,0279	0,0303	0,0345	0,0394	0,0416	0,0676	0,077	0,0979	0,1232	0,139	0,1591
NaCl	Blanco	0,0073	0,0181	0,0244	0,0312	0,0468	0,0749	0,085	0,1099	0,1175	0,1236	0,1311	0,1371	0,1485
Na2SO4	Blanco	0,008	0,0211	0,027	0,0341	0,0575	0,0923	0,0995	0,1168	0,1285	0,1336	0,1443	0,1523	0,1621

Fuente: Realizada en esta investigación.

Tabla B.2: Datos Prueba de pérdida de peso para placas de acero al carbono en cloruro de sodio y sulfato de sodio, en presencia y ausencia de extracto de Neem a diferentes concentraciones y 25°C. (Réplica)

	TIEMPO	24 h	48 h	72 h	96 h	120 h	168 h	264 h	288 h	336 h	360 h	384 h	408 h	432 h
Medio corrosivo	Concentración	W1 (g)	W2 (g)	W3 (g)	W4 (g)	W5 (g)	W6 (g)	W7 (g)	W8 (g)	W9 (g)	W10 (g)	W11 (g)	W12 (g)	W13 (g)
NaCl	5%	0,0002	0,0005	0,0006	0,0006	0,0007	0,0008	0,0025	0,0155	0,0156	0,0156	0,0175	0,0179	0,0209
NaCl	10%	0,0056	0,0064	0,0075	0,0077	0,0086	0,0094	0,0102	0,013	0,0137	0,0157	0,0168	0,0184	0,0202
Na2SO4	5%	0,0043	0,0143	0,0144	0,0145	0,0233	0,0402	0,0535	0,0733	0,0826	0,0923	0,1144	0,1236	0,1377
Na2SO4	10%	0,0075	0,0268	0,0285	0,0295	0,0339	0,039	0,0428	0,0572	0,0652	0,0777	0,1061	0,1297	0,1389
NaCl	Blanco	0,0089	0,0172	0,0236	0,0295	0,0465	0,0758	0,084	0,1022	0,1102	0,1154	0,1243	0,1295	0,1468
Na2SO4	Blanco	0,01	0,02	0,0327	0,0327	0,0538	0,0895	0,0994	0,1194	0,1292	0,1335	0,1423	0,1482	0,1579

Fuente: Realizada en esta investigación.

Tabla B.3: Promedio de los datos de prueba de pérdida de peso para placas de acero al carbono en cloruro de sodio y sulfato de sodio, en presencia y ausencia de extracto de Neem a diferentes concentraciones y 25°C.

Medio corrosivo	TIEMPO	24 h	48 h	72 h	96 h	120 h	168 h	264 h	288 h	336 h	360 h	384 h	408 h	432 h
	Concentración	W1 (g)	W2 (g)	W3 (g)	W4 (g)	W5 (g)	W6 (g)	W7 (g)	W8 (g)	W9 (g)	W10 (g)	W11 (g)	W12 (g)	W13 (g)
NaCl	5%	0,0005	0,0008	0,00145	0,00155	0,0018	0,00215	0,00355	0,02365	0,0249	0,02775	0,0297	0,03035	0,03235
NaCl	10%	0,0045	0,0054	0,0062	0,00665	0,00725	0,01275	0,0132	0,0197	0,02005	0,02585	0,03105	0,03485	0,0373
Na2SO4	5%	0,00415	0,01455	0,01475	0,01495	0,0228	0,03935	0,04875	0,0822	0,09085	0,1002	0,1169	0,12655	0,13805
Na2SO4	10%	0,00805	0,0261	0,0282	0,0299	0,0342	0,0392	0,0422	0,0624	0,0711	0,0878	0,11465	0,13435	0,149
NaCl	Blanco	0,0081	0,01765	0,024	0,03035	0,04665	0,07535	0,0845	0,10605	0,11385	0,1195	0,1277	0,1333	0,14765
Na2SO4	Blanco	0,009	0,02055	0,02985	0,0334	0,05565	0,0909	0,09945	0,1181	0,12885	0,13355	0,1433	0,15025	0,16

Fuente: Realizada en esta investigación.

Tabla B.4: Datos Prueba de pérdida de peso para placas de aluminio en cloruro de sodio y sulfato de sodio, en presencia y ausencia de extracto de Neem a diferentes concentraciones y 25°C.

Medio corrosivo	TIEMPO	24 h	48 h	72 h	96 h	120 h	168 h	264 h	288 h	336 h	360 h	384 h	408 h	432 h
	Concentración	W1 (g)	W2 (g)	W3 (g)	W4 (g)	W5 (g)	W6 (g)	W7 (g)	W8 (g)	W9 (g)	W10 (g)	W11 (g)	W12 (g)	W13 (g)
NaCl	5%	0,0002	0,0016	0,0023	0,0026	0,0028	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,0032	0,0032
NaCl	10%	0,0003	0,0017	0,002	0,0023	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0026	0,0026	0,0026	0,0026
Na2SO4	5%	0,0003	0,0006	0,0009	0,001	0,001	0,001	0,001	0,0014	0,0014	0,0014	0,0014	0,0016	0,0016
Na2SO4	10%	0,0003	0,0003	0,0003	0,0005	0,0007	0,0007	0,0007	0,0008	0,001	0,001	0,001	0,0011	0,0011
NaCl	Blanco	0,0001	0,0003	0,0004	0,0005	0,0009	0,0012	0,0012	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016
Na2SO4	Blanco	0	0,0003	0,0004	0,0005	0,0006	0,0007	0,0007	0,0012	0,0013	0,0013	0,0013	0,0014	0,0014

Fuente: Realizada en esta investigación.

Tabla B.5. Datos Prueba de pérdida de peso para placas de aluminio en cloruro de sodio y sulfato de sodio, en presencia y ausencia de extracto de Neem a diferentes concentraciones y 25°C. (Réplica)

TIEMPO		24 h	48 h	72 h	96 h	120 h	168 h	264 h	288 h	336 h	360 h	384 h	408 h	432 h
Medio corrosivo	Concentración	W1 (g)	W2 (g)	W3 (g)	W4 (g)	W5 (g)	W6 (g)	W7 (g)	W8 (g)	W9 (g)	W10 (g)	W11 (g)	W12 (g)	W13 (g)
NaCl	5%	0	0,0014	0,0017	0,0019	0,0022	0,0023	0,0024	0,0024	0,0024	0,0024	0,0024	0,0027	0,0028
NaCl	10%	0,0004	0,0015	0,0016	0,0017	0,002	0,0021	0,0021	0,0021	0,0021	0,0021	0,0021	0,0021	0,0021
Na2SO4	5%	0,0003	0,0008	0,001	0,001	0,0011	0,0013	0,0014	0,0014	0,0014	0,0014	0,0014	0,0014	0,0014
Na2SO4	10%	0,0001	0,0006	0,0006	0,0007	0,0008	0,0009	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,0012	0,0012
NaCl	Blanco	0,0003	0,0004	0,0005	0,0005	0,0008	0,0008	0,0008	0,0009	0,001	0,001	0,0011	0,0011	0,0011
Na2SO4	Blanco	0	0,0005	0,0005	0,0007	0,0011	0,0013	0,0013	0,0014	0,0017	0,0017	0,0017	0,0018	0,0018

Fuente: Realizada en esta investigación.

Tabla B.6: Promedio de los datos de prueba de pérdida de peso para placas de acero al carbono en cloruro de sodio y sulfato de sodio, en presencia y ausencia de extracto de Neem a diferentes concentraciones y 25°C.

TIEMPO		24 h	48 h	72 h	96 h	120 h	168 h	264 h	288 h	336 h	360 h	384 h	408 h	432 h
Medio corrosivo	Concentración	W1 (g)	W2 (g)	W3 (g)	W4 (g)	W5 (g)	W6 (g)	W7 (g)	W8 (g)	W9 (g)	W10 (g)	W11 (g)	W12 (g)	W13 (g)
NaCl	5%	0,00001	0,0015	0,002	0,00225	0,0025	0,00265	0,0027	0,0027	0,0027	0,0027	0,0027	0,00295	0,003
NaCl	10%	0,00035	0,0016	0,0018	0,002	0,00225	0,0023	0,0023	0,0023	0,0023	0,00235	0,00235	0,00235	0,00235
Na2SO4	5%	0,0003	0,0007	0,00095	0,001	0,00105	0,0015	0,0012	0,0014	0,0014	0,0014	0,0014	0,0015	0,0015
Na2SO4	10%	0,0002	0,00045	0,00045	0,0006	0,00075	0,0008	0,00085	0,0009	0,001	0,001	0,001	0,00115	0,00115
NaCl	Blanco	0,0002	0,00035	0,00045	0,0005	0,00085	0,001	0,001	0,00125	0,0013	0,0013	0,0013	0,00135	0,00135
Na2SO4	Blanco	0	0,0004	0,00045	0,0006	0,00085	0,001	0,001	0,0013	0,0015	0,0015	0,0015	0,0016	0,0016

Fuente: Realizada en esta investigación.

Tabla B7: Velocidad de corrosión del acero al carbono en cloruro de sodio y sulfato de sodio a diferentes concentraciones del extracto inhibidor, durante 432 horas de exposición.

MEDIO CORROSIVO	CONCENTRACIÓN DEL EXTRACTO (v/v)	VELOCIDAD DE CORROSIÓN (g/h)
NaCl	5%	0,0000747
NaCl	10%	0,0000859
Na ₂ SO ₄	5%	0,0003188
Na ₂ SO ₄	10%	0,0003440
NaCl	Blanco	0,0003407
Na ₂ SO ₄	Blanco	0,0003691

Fuente: Realizada en esta investigación.

Tabla B8: Velocidad de corrosión del aluminio en cloruro de sodio y sulfato de sodio a diferentes concentraciones del extracto inhibidor, durante 432 horas de exposición.

MEDIO CORROSIVO	CONCENTRACIÓN DEL EXTRACTO (v/v)	VELOCIDAD DE CORROSIÓN (g/h)
NaCl	5%	0,00000687
NaCl	10%	0,00000536
Na ₂ SO ₄	5%	0,000003438
Na ₂ SO ₄	10%	0,000002640
NaCl	Blanco	0,000003106
Na ₂ SO ₄	Blanco	0,0000037

Fuente: Realizada en esta investigación.

Anexo C. Datos de prueba de isoterma de adsorción.

Tabla C1: Pruebas isoterma de adsorción de cloruro de sodio en acero al carbono a diferentes concentraciones del extracto inhibidor, durante 24 horas de exposición.

CONCENTRACIÓN EXTRACTO	W1 (g)	W2 (g)	ΔW	VEL. DE CORROSIÓN (g/h)	EI (%)	θ (Grado de recubrimiento)	C/ θ (%V/V)	C/ θ (mL/L)
7%	44,7914	44,7867	0,0047	0,00019583	-46,875	-0,46875	-	0
5%	44,6260	44,6257	0,0003	0,0000125	90,625	0,90625	5,51724138	0,55172414
3%	43,2054	43,2048	0,0006	0,0000250	81,25	0,8125	3,69230769	0,36923077
1%	42,4532	42,4516	0,0016	0,0000667	50	0,5	2	0,2
0.5%	45,8596	45,8573	0,0023	0,0000958	28,125	0,28125	1,77777778	0,17777778
Blanco	44,2671	44,2639	0,0032	0,0001333				

Fuente: Realizada en esta investigación.