

**Determinación de la velocidad de corrosión de un acero API 5L- X42 en agua de mar  
sintética**

**Liz María Roncallo Cervantes & Yenny Fernanda Flórez Oviedo**

**Trabajo de investigación, presentado como requisito para optar al título de ingeniero  
químico**

**Director:**

**Ph.D. Darío Yesid Peña Ballesteros**

**Universidad Industrial de Santander**

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas**

**Escuela de Ingeniería Química**

**Bucaramanga**

**2024**

### **Dedicatoria.**

Primero que todo le damos gracias a Dios por su respaldo en todo nuestro proceso académico, Porque gracias a Él tuvimos las fuerzas y la sabiduría para culminar con éxito nuestra carrera.

A nuestros padres que con su incondicional amor y confianza nos apoyaron en los momentos más difíciles dándonos palabras de motivación y alientos y por el gran esfuerzo que hicieron y que hacen diariamente para que no nos hiciera falta nada. Aun cuando estaban lejos podíamos sentir su amor y apoyo incondicional.

A nuestros hermanos y a mi cuñada Angie les estamos inmensamente agradecidos por acogernos con tanto amor en sus hogares y brindarnos compañía y apoyo absoluto.

A nuestros sobrinos que en los momentos más difíciles nos sacaron sonrisas con sus ocurrencias.

A esos profesores que creyeron en nosotras y nos acompañaron en el proceso de formación como ingenieras químicas estamos sumamente agradecidas por tanto apoyo y a los que no también.

Agradecidas entre nosotras por el buen acompañamiento que tuvimos y el apoyo que nos dimos y el buen compañerismo que desarrollamos durante la carrera y el proceso de realización de nuestra tesis (te quiero mejor amiga).

### **Agradecimientos.**

✓ A nuestro director Darío Peña por confiar en nosotras y tener la tolerancia y la pasión por la enseñanza, ya que tenía el tacto y la paciencia para explicarnos aquellas cosas que no entendíamos y aun cuando al inicio y en el desenlace del proyecto hubo inconvenientes que nos limitaron o atrasaron nuestra investigación.

✓ Al grupo de investigación (GIC) de la universidad industrial de Santander que nos facilitaron los equipos con los cuales realizamos nuestras investigaciones y nos enseñaron que era un ambiente de trabajo ameno y colaborativo.

✓ Al laboratorio de DRX por facilitarnos las respectivas pruebas a unos de nuestros materiales a estudiar de la tesis y por suministrar el préstamo a las instalaciones y los equipo para su respectivo análisis.

✓ Al Ph.D. Hugo Armando Estupiñán Duran, director del Departamento de Materiales y Minerales en Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, por proveer el equipo SEM y acompañarnos en el estudio de algunas piezas a estudiar.

**Tabla de Contenido.**

	<b>Pág.</b>
Introducción. ....	12
1. Objetivos. ....	14
1.1 Objetivo general. ....	14
1.2 Objetivos específicos. ....	14
2. Marco conceptual. ....	15
2.1 Corrosión. ....	15
2.2 Corrosión Generalizada. ....	15
2.3 Corrosión localizada por picadura. ....	16
2.4 Aceros API 5L-X42. ....	16
2.5 Resistencia a la polarización ( $R_p$ ). ....	16
2.6 Técnica de extrapolación de Tafel. ....	17
2.7 Velocidad de corrosión. ....	17
2.8 Pérdida de masa. ....	18
2.9 Microscopia electrónica de barrido (SEM). ....	19
2.10 Difracción de rayos (DRX). ....	19
2.11 Potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ). ....	19
2.13 Electrodo de plata/Cloruro de plata (Ag/AgCl). ....	20
2.14 Electrodo auxiliar o contraelectrodo. ....	20
3. Estado del arte. ....	21
4. Metodología. ....	22
4.1 Proposición de secuencia para el desarrollo de la investigación. ....	22
4.2 Materiales y preparación. ....	23
4.3 Exposición de cada cupón en el ambiente simulado. ....	24

4.4 Operaciones con el potencióstato Gamry 600 en estudios electroquímicos. ....	25
4.5 Determinación y caracterización del acero. ....	27
5. Resultados. ....	28
5.1 Curvas Potenciodinámicas. ....	28
5.2 Curvas de Tafel. ....	30
5.3 Ensayo por pérdida de masa. ....	39
5.4 Resistencia a la polarización. ....	41
5.5 Difracción de rayos X (DRX). ....	42
5.6 Microscopia Electrónica de Barrido. ....	43
6. Conclusiones. ....	46
7. Recomendaciones. ....	48
Referencias Bibliográficas .....	49
Apéndices. ....	53

**Lista de Tablas.**

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1.</b> <i>Valores de las pendientes anódicas y catódicas, densidad de corrosión, potencial de corrosión y calculo velocidad de corrosión y resistencia de polarización por potenciodinámica (Tafel).....</i>	32
<b>Tabla 2.</b> <i>Cálculos de pérdida de peso de cada cupo según el tiempo de inversión y la velocidad de corrosión por este método.....</i>	40
<b>Tabla 3.</b> <i>Calculo velocidad de corrosión y resistencia de polarización por RP. ....</i>	42

### Lista de Figuras.

	Pág.
<b>Figura 1.</b> Metodología experimental implementada en el presente trabajo de grado.....	22
<b>Figura 2.</b> Superficie uniforme del acero API 5L -X42 después del proceso de desbaste.....	24
<b>Figura 3.</b> Proceso de inmersión de los cupones.....	25
<b>Figura 4.</b> Montaje experimental.....	26
<b>Figura 5.</b> Curvas de potenciodinámica de los cupones para cada tiempo de inmersión. ....	30
<b>Figura 6.</b> Curvas de potenciodinámica a los diferentes tiempos. ....	31
<b>Figura 7.</b> Velocidad de corrosión en los diferentes días de inmersión en el agua de mar sintética. .....	33
<b>Figura 8.</b> Comportamiento de polarización potenciodinámica (Tafel) para cupón de cero días. .....	34
<b>Figura 9.</b> Comportamiento de polarización potenciodinámica (Tafel) para cupón de siete días. .....	35
<b>Figura 10.</b> Comportamiento de polarización potenciodinámica (Tafel) para cupón de catorce días. .....	36
<b>Figura 11.</b> Comportamiento de polarización potenciodinámica (Tafel) para cupón de veintiún días. .....	37
<b>Figura 12.</b> Comportamiento de polarización potenciodinámica (Tafel) para cupón de treinta días. .....	38
<b>Figura 13.</b> Comportamiento de polarización potenciodinámica (Tafel) para cupón de cero días para agua de mar.....	39
<b>Figura 14.</b> Variación de la pérdida de masa con el tiempo para el acero API 5L -X42. ....	40
<b>Figura 15.</b> Curvas de resistencia a la polarización linealizada a los diferentes tiempos. ....	42
<b>Figura 16.</b> Patrones de difracción de rayos X del producto de corrosión obtenido a partir de los cinco cupones expuestos al medio simulado.....	43
<b>Figura 17.</b> Espectro cualitativo EDS de cupón de treinta días para el acero API 5L - X42.....	44
<b>Figura 18.</b> Resultados SEM del cupón de cero días de inmersión del acero API 5L -X42 a una magnificación de 100x. ....	44
<b>Figura 19.</b> Resultados SEM del cupón de treinta días de inmersión del acero API 5L -X42, a) morfología de 100x, b) morfología de 250x y c) morfología de 500x. ....	45

**Lista de apéndices.**

	<b>Pág.</b>
<b>Apéndice A.</b> <i>Cupones de acero al carbono API 5L -X42 suministrados por el proveedor.</i> .....	53
<b>Apéndice B.</b> <i>Composición química del acero API 5L – X42.</i> .....	53
<b>Apéndice C.</b> <i>Composición química de agua de mar sintética.</i> .....	55
<b>Apéndice D.</b> <i>Condiciones de trabajo para las pruebas electroquímicas.</i> .....	56
<b>Apéndice E.</b> <i>Cupones después de realizada la prueba potenciodinámica.</i> .....	57
<b>Apéndice F.</b> <i>Curvas de potenciodinámica para los diferentes tiempos de inmersión</i> .....	58
<b>Apéndice G.</b> <i>Comportamiento de polarización potenciodinámica (Tafel).</i> .....	59
<b>Apéndice H.</b> <i>Curvas de resistencia a la polarización a los diferentes tiempos</i> .....	62
<b>Apéndice I.</b> <i>Pérdida de masa de los cupones por inmersión.</i> .....	63
<b>Apéndice J.</b> <i>Registro de cuantitativo de peso de los cupones para el cálculo de la pérdida de masa.</i> .....	65

**Glosario.**

DRX	Difracción de rayos X
SEM	Espectroscopia electrónica de barrido
$V_{corr}$	Velocidad de corrosión
$i_{corr}$	Densidad de corriente
$\beta_A$	Pendiente de anódica de Tafel
$\beta_c$	Pendiente catódica de Tafel
RP	Resistencia a la polarización
$E_{0PC}$	Potencial de corrosión en circuito abierto
RPL	Resistencia a la polarización lineal
ASTM	American Society for Testing and Materials
P0	Cero días en contacto con el medio corrosivo simulado.
P1	Siete días en contacto con el medio corrosivo simulado.
P2	Catorce días en contacto con el medio corrosivo simulado.
P3	Veintiún días en contacto con el medio Corrosivo simulado.
P4	Treinta días en contacto con el medio corrosivo simulado.
P0. A	Cero días en contacto con el medio de Agua de mar.

### Resumen.

**Título:** Determinación de la velocidad de corrosión de un acero API 5L-X42 en agua de mar sintética\*

**Autores:** Liz María Roncallo Cervantes, Yenny Fernanda Flórez Oviedo\*\*

**Palabras claves:** Velocidad de corrosión, agua mar sintética, acero API 5L-X42.

**Descripción:** Pretende obtener más información sobre cómo afecta la velocidad de corrosión al acero API 5L-X42 cuando está en contacto con un medio de agua de mar (sintética). El objetivo principal es analizar la calidad del acero API 5L-X42 cuando se utiliza en tuberías de la industria petroquímica, en su comportamiento electroquímico, para comprender cómo responde este material a la corrosión en agua de mar sintética simulada, con iones de cloruro conocidos por ser agresivos. El análisis mediante diferentes tiempos de inmersión para evaluar la respuesta del acero a largo plazo en contacto directo con este entorno sintético y una prueba en un entorno real de agua de mar en tiempo cero, para estudiar las respuestas de los tiempos cero tanto en el medio sintético como el medio real (traída de Cartagena). Un proceso de desbaste en los cupones de acero para lograr una superficie homogénea, mejorando los resultados al exponer el acero a una solución marina simulada durante un periodo de treinta días. Cinco cupones fueron sometidos a intervalos de tiempos diferentes. Aplicando técnicas electroquímicas, incluyendo Resistencia a la Polarización ( $R_p$ ), Tafel, potencial de corrosión, se observó la microestructura a través de SEM y DRX para estudiar la corrosión generalizada.

Los resultados mostraron la variación de la velocidad de corrosión a partir de las curvas Tafel y respuesta de la  $R_p$  a partir de las pendientes de esa curva se obtuvo para ambas técnicas que la tendencia de la velocidad de corrosión para los cupones era disminuir a medida que pasaba el tiempo ya que la densidad de corriente mostro una tendencia decreciente, atribuible a la formación de productos de corrosión que actuaron como obstáculos para la difusión de iones de cloruro, hidróxido y sulfuro hacia la superficie del acero. Por medio de las técnicas de SEM y DRX se evidenció que el elemento Cl presente en el agua de mar sintética era el responsable mayoritariamente de la formación de la corrosión; además, las morfologías observadas proporcionaron detalles sobre la capa de óxido formada y los productos de corrosión formados en el cupón de 30 días de exposición.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingeniería Físicoquímica. Escuela de Ingeniería Química. Director Ph.D en Corrosión Darío Yesid Peña Ballesteros.

**Abstract.**

**Title:** Determination of the corrosion rate of an API 5L-X42 steel in synthetic seawater.\*

**Authors:** Liz María Roncallo Cervantes, Yenny Fernanda Flórez Oviedo\*\*

**Key words:** Corrosion rate, synthetic seawater, API 5L – X42 steel.

**Description:** The present research aims to obtain more information on how the corrosion rate of API 5L X42 steel is affected when it is in contact with a seawater (synthetic) medium. The main objective of this study is to analyze the quality of API 5L X42 steel when used in petrochemical industry pipelines, focusing on its electrochemical behavior, it seeks to understand how this material responds to corrosion in simulated synthetic seawater, with chloride ions known to be aggressive. The analysis is performed at different immersion times to evaluate the long-term response of the steel in direct contact with this synthetic environment. First, a roughing process was carried out on the steel coupons to achieve a homogeneous surface, thus improving the results by exposing the steel to a simulated marine solution for a period of thirty days. Five coupons were subjected to different time intervals. Subsequently, electrochemical techniques were applied, including Polarization Resistance (Rp), Tafel, corrosion potential, and the microstructure was observed through SEM and XRD to study generalized corrosion.

The results showed the variation of the corrosion rate using Tafel curves and the polarization resistance (RP) response. For both techniques, it was observed that the trend of corrosion rate the coupons decreased over time. This was attributed to the decreasing current density, which was caused by the formation of corrosion products acting as barriers to the diffusion of chloride, hydroxide, and sulfide ions towards the steel surface. SEM and XRD techniques showed that the Cl element present in the synthetic seawater was responsible for the corrosion formation; in addition, the morphologies observed provided details about the oxide layer formed and the corrosion products formed in the 30-day coupon.

---

\* Degree work

\*\*Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director Ph.D in corrosion Darío Yesid Peña Ballesteros.

## **Introducción.**

La corrosión es un proceso electroquímico que hace que un metal se deteriore al reaccionar con el medio ambiente. El proceso de corrosión degrada el hierro del acero, lo que supone la pérdida de sus propiedades primarias como la dureza o la resistencia eléctrica (COVER SYSTEMS, 2021). La corrosión, en otra definición, es el daño o degradación de un metal debido a la producción de compuestos no deseados y reacciones redox entre el metal y diversas sustancias (I Saefuloh, N Kanani, Y Rukmayadi, M I Noor, Y Yusuf, I Setiawan, S ula, S Abdullah, H A Notonegoro, 2020). Los aceros al carbono son metales utilizados actualmente en industrias no metálicas, se utilizan únicamente en el procesamiento de metales y la metalurgia, pero también se utilizan en diversas áreas industriales y comerciales como la industria del petróleo y el gas, no solo a nivel industrial a gran escala sino también en el transporte de productos y almacenamiento, esto se debe a sus características (America Petroleum Institute, 2012).

La corrosión de las tuberías de acero es un proceso electroquímico relacionado con la disolución de las tuberías en agua de mar o sedimentos del fondo (M. Madrigal-Cano, L. Hernández-Maya, J.M. Hallen, M. Corrales-Luna, E.M. Arce-Estrada, T. Le Manh, 2018) (M.A. Azam, M.F. Ibrahim, M. Zaimi, 2015). Las tuberías enterradas bajo el agua deberían tener menos corrosión debido al menor contenido de oxígeno, pero las tuberías marinas suelen ser susceptibles a la corrosión y los factores bioquímicos submarinos pueden agravar la corrosión ( S.S. Prabha, R.J. Rathish, R. Dorothy, G. Brindha, M. Pandiarajan, A. Al-Hashem, S. Rajendran, 2014). La concentración de sal en el medio ambiente y la temperatura local afectan la resistividad y el valor del PH, por lo que se produce un comportamiento de degradación debido al medio ambiente y a la potencial corrosividad (Asyadi Azam, M., Sukarti, S., Zaimi, M, 2020). Si bien, los aceros presentan buenas propiedades mecánicas en ciertos procesos de aplicación y en ciertas industrias

donde se requiere su implementación. Cuando estos se utilizan están sujetos a factores adversos, conocidos como mecanismos de degradación, tales como contaminación, condiciones ambientales presentes en el medio externo o interno, independientemente de si se trata de una simulación o de un entorno interno simulado o propio (Cambridge, 2009). Uno de los factores negativos que se produce en estos materiales es la corrosión. Este es un mecanismo que afecta al metal cuando más necesita resistencia. Por lo tanto, el acero al carbono tiene una gran demanda en las industrias de procesos y de infraestructura debido a su excelente resistencia a la corrosión para ahorrar dinero en inspecciones, mantenimiento, repuestos e incluso reducir las pérdidas financieras por la reducción de la producción en las grandes empresas necesitadas. De lo anterior se puede deducir que las tuberías utilizadas en la industria de oleoductos y gasoductos enfrentan un mayor riesgo de corrosión que las tuberías normales, ya que los recubrimientos pueden sufrir una degradación muy alta, lo que puede resultar en pérdidas significativas en términos de costo. Además, si el agua de mar contiene un alto contenido de cloruro y/o un bajo contenido de sulfato; los riesgos de corrosión del hierro son más solubles (A.I.M. Ismail, A.M. El-Shamy, 2009) ( E.S.D.D. Oliveira, R.F.D.C. Pereira, I.R.D. Melo, M.A.G.D.A. Lima, S.L. Urtiga Filho, 2017). La actividad de las bacterias reductoras de sulfato también varía con los cambios de salinidad y temperatura (A. Robador, V. Brüchert, B.B. Jørgensen, 2009).

En el presente trabajo de investigación, se analizará la velocidad de corrosión de un acero API 5LX-42 en un ambiente marino simulado, donde el material estará expuesto hasta treinta (30) días, con el fin de determinar el tipo de corrosión y su desempeño bajo estas condiciones.

## **1. Objetivos.**

### **1.1 Objetivo general.**

Estudiar el comportamiento electroquímico de un acero de carbono API 5L- X42 en agua de mar sintética y a diferentes tiempos de inmersión.

### **1.2 Objetivos específicos.**

Determinar las velocidades de corrosión de un acero al carbono API 5L- X42, expuestos en una solución de agua de mar sintética por medio de técnicas electroquímicas como la técnica de resistencia a la polarización y potenciodinámica.

Caracterizar el acero al carbono API 5L- X42 por medio de las técnicas DRX y SEM antes y después de la exposición al medio con el fin de determinar el posible mecanismo de daño superficial.

## **2. Marco conceptual.**

### **2.1 Corrosión.**

La corrosión es un término utilizado para describir el proceso por el cual los materiales metálicos, incluidos los metales puros y sus aleaciones, se deterioran mediante reacciones químicas y electroquímicas (Salazar-Jiménez, 2015).

La mayoría de los procesos de corrosión implican reacciones de reducción- oxidación (reacciones electroquímicas), y para el desarrollo de estos procesos es necesaria la presencia de tres componentes: (1) unos electrodos (ánodo y cátodo), (2) un electrolito, como un medio conductor, correspondiente en la mayoría de los casos a soluciones acuosas, y (3) conexiones eléctricas entre electrodos (ECCA, 2011). El potencial electroquímico define la sensibilidad o resistencia de un material metálico a la corrosión, y su valor varía dependiendo de la composición del electrolito. Cuanto más positivo sea el valor de dicho potencial, más noble (duradero) será el material. Y en el caso contrario, cuanto mayor sea el efecto negativo, mayor será la reactividad del material a la corrosión (Salazar-Jiménez, 2015).

### **2.2 Corrosión Generalizada**

La corrosión generalizada, también conocida como corrosión uniforme, se produce de manera uniforme en toda la superficie de un material, causando que se deteriore por completo. Este tipo de corrosión causa la mayor pérdida de material, pero es relativamente fácil de predecir y controlar, por lo que los accidentes causados por ella son raros (Revie, 2011). En ambientes marinos u otros ambientes corrosivos, la superficie del acero al carbono o de baja aleación

comienza a degradarse, formando una capa de óxido de hierro que se espesa con el tiempo hasta que se desprende y desencadena una nueva capa de óxido (Salazar-Jiménez, 2015).

### **2.3 Corrosión localizada por picadura.**

A diferencia de la corrosión uniforme, la corrosión localizada representa un riesgo potencial mayor porque es difícil de detectar porque se manifiesta en áreas específicas del material, lo cual está determinado por la naturaleza del material su geometría y el estado del material de corrosión. La corrosión por picaduras es una de las formas de corrosión más destructivas, Suele ocurrir en materiales pasivados y su aparición está relacionada con la destrucción de la película protectora sobre la superficie del metal. Una vez se forma una abolladura, su velocidad de penetración aumenta y se propaga hacia el interior del metal (Salazar-Jiménez, 2015).

### **2.4 Aceros API 5L-X42.**

Los aceros API 5L-X42 es un tipo de acero compuesto de carbono y hierro. su nombre se debe a su límite elástico mínimo de 42 ksi. De la clasificación de API 5L se encuentran varios grados donde en último es el X100, poniendo al X42 en un nivel medio bajo, por lo que requiere de cantidades más consideradas para las tuberías de transportes de gas y petróleo (OCTAL).

Las propiedades de las composiciones químicas que este acero presenta es  $C \leq 0.28\%$ ,  $Mn \leq 1.3\%$ ,  $P \leq 0.030\%$ ,  $S \leq 0.030\%$ ,  $Nb+V \leq 0.06\%$ ,  $V+Nb+Ti \leq 0.15\%$  (OCTAL).

### **2.5 Resistencia a la polarización (Rp).**

Es la resistencia de transición entre electrodo y electrolito. En otras palabras, el aumento de la resistencia a la corriente en una celda galvánica es causado por reacciones químicas en los

electrodos. La polarización hace que disminuya el potencial a través de la celda voltamétrica (Industriapedia, 2022).

## 2.6 Técnica de extrapolación de Tafel.

La técnica de extrapolación de Tafel requiere únicamente un proceso electroquímico, cuyo propósito es determinar la tasa de transferencia de carga (control de activación). Si se utiliza una curva de polarización experimental (estado estacionario), entonces no se adaptará completamente al proceso de corrosión, ya que para registrarla será necesario sacar el sistema del equilibrio. La extrapolación de Tafel permite conocer  $E_{corr}$  y  $I_{corr}$  (UNLP, 2016).

## 2.7 Velocidad de corrosión.

La tasa de corrosión es la velocidad a la que cualquier metal se deteriora en un entorno específico. También se puede definir como la cantidad de pérdida de espesor por corrosión por año. La velocidad o tasa de deterioro depende de las condiciones ambientales y del tipo y condición del metal involucrado (Industriapedia, 2022).

La densidad de la corriente ( $I_{corr}$ ), está relacionada con la resistencia a la polarización por el coeficiente de Stern – Geary según la norma ASTM G58- 78 (ASTM, 2020).

$$I_{corr} = 10^6 \left[ \frac{\beta}{R_p} \right] \quad (\text{Ec.1})$$

Donde:

$R_p$ =Resistencia a la polarización [ $\text{ohm} - \text{cm}^2$ ]       $I_{corr}$  = Corriente de corrosión [ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ]     $\beta$   
= Coeficiente de Stern – Geary [V]

$\beta$  está relacionada con los coeficientes anódico ( $\beta_a$ ) y catódico ( $\beta_c$ ) de las curvas de Tafel.

$$\beta = \frac{ba*bc}{2.303(ba+bc)} \quad (\text{Ec.2})$$

Donde ba y bc =[V]

La velocidad de corrosión ( $V_{\text{corr}}$ ), se puede determinar en función de la densidad de la corriente ( $I_{\text{corr}}$ ), de la densidad del material ( $\rho$ ) y del peso equivalente (PE) según la Norma ASTM G102 – 89 (ASTM, 2023).

$$V_{\text{corr}} = k \left[ \frac{I_{\text{corr}}*PE}{\rho} \right] \quad (\text{Ec.3})$$

Velocidad de corrosión ( $V_{\text{corr}}$ ) = mpy

Densidad de la corriente ( $I_{\text{corr}}$ ) =  $\frac{\mu A}{cm^2}$

Densidad del material ( $\rho$ ) =  $\frac{g}{cm^3}$

Peso equivalente (PE) = g

Contante (k) =  $\frac{mpy*g}{\mu A*cm}$

En donde, el valor de k (constante de proporcionalidad) es de 0.129 para poder calcular la velocidad de corrosión en Mili pulgadas por año (mpy).

## 2.8 Pérdida de masa.

Por medio de la pérdida de masa se puede calcular la velocidad de corrosión a través de la siguiente formula teniendo en cuenta la norma ASTM G – 31 (ASTM, 2012):

$$V_{\text{corr}}(mpy) = \frac{\text{mass loss (g)}*(3,45*10^6)}{\text{density}\left(\frac{g}{cm^3}\right)*\text{area}(cm^2)*\text{exposure time}(h)} \quad (\text{Ec.4})$$

## **2.9 Microscopía electrónica de barrido (SEM).**

La microscopía electrónica de barrido (SEM) utiliza electrones en lugar de luz para producir imágenes. El dispositivo hace esto mediante el uso de un dispositivo llamado filamento, que produce un haz de electrones para iluminar el cupón. Luego se recolectan los electrones producidos por el cupón. Interacción con la superficie a través de diferentes detectores. Esto es para crear una imagen que refleje las características de su superficie (Universidad de Burgos, 2020; Universidad de Burgos, 2020).

## **2.10 Difracción de rayos (DRX).**

La difracción de rayos X es una técnica comúnmente utilizada para el análisis de productos de corrosión. Es la única técnica para este tipo de análisis y también genera datos sobre la composición de fases de los materiales sólidos. La determinación de la composición de fase, en contraste con las composiciones elementales, es vital para comprender e investigar el proceso de corrosión. Diversas fases ocurren bajo diferentes ambientales y condiciones. Por lo tanto, la información sobre las fases químicas es muy beneficiosa para explicar el proceso de corrosión (Industiapedia, 2022).

## **2.11 Potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ).**

Indica la facilidad con la que se corroe un material. Si dos metales se juntan en contacto con un electrolito, el metal con menor potencial de corrosión actuará como ánodo y se producirá corrosión. (Innovation, 2021).

Cuando la pendiente de Tafel sobrepasa el potencial de corrosión esto indica que el material está empezando el proceso de oxidación por otro lado cuando el potencial de corrosión está por encima del potencial que se le suministra al electrodo entonces el material incurre en un proceso

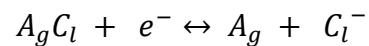
de reducción. Por lo tanto, el material experimenta lo que se conoce como protección catódica (García, 2009).

### **2.12 Pasivación.**

Aspecto de la superficie metálica que está caracterizada por bajas velocidades de corrosión en una región de potencial que es de fuerte oxidación para el metal. También se conoce como la eliminación del hierro exógeno por medio de una disolución química (Cerdán, 2023).

### **2.13 Electrodo de plata/Cloruro de plata ( $Ag/AgCl$ ).**

Este electrodo posee la capacidad de proporcionar un potencial estable al momento de ser utilizado como electrodo de referencia en celdas. En una solución de KCl este actúa como ánodo y presenta la siguiente reacción (Udelar, 2020).



### **2.14 Electrodo auxiliar o contraelectrodo.**

Se utiliza para transmitir la corriente para o desde un electrodo de prueba. Estos están fabricados de un material que no puede interferir en la reacción dicho de este modo debe ser inerte, pueden ser elaborado de platino o grafito, este se encarga de completar el circuito de la celda, ya que el material del contraelectrodo no participa en la reacción electroquímica o en su defecto si llegase a reaccionar los productos de su reacción no ejercen influencia en la medida que realizamos (Udelar, 2020).

### 3. Estado del arte.

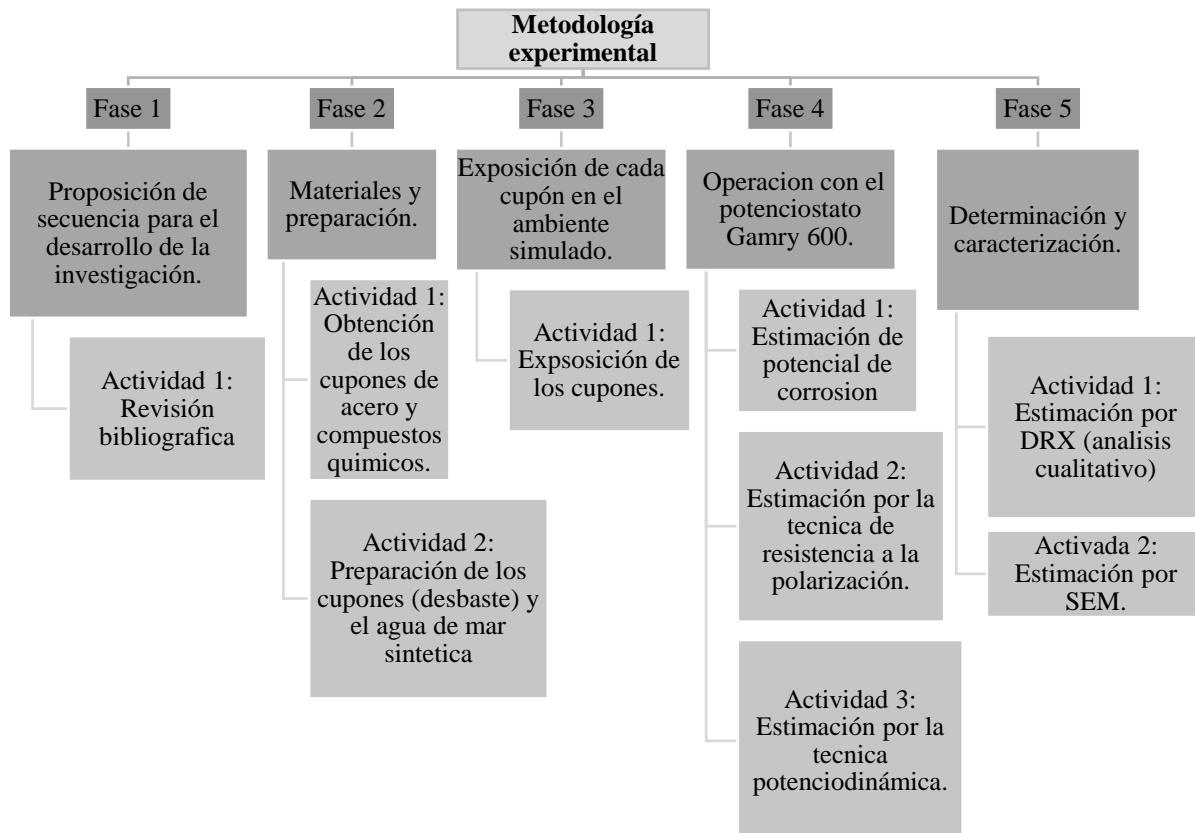
Con la problemática de alta corrosividad en las tuberías de oleoductos/gasoductos en el agua de mar, se inicia el estudio para determinar las velocidades de corrosión por diferentes técnicas, para estudiar si la corrosión en los diferentes cuerpos acuáticos. Se han realizado ya investigaciones sobre el comportamiento del acero para oleoductos y gasoductos en las aguas de Mar del sur de China y del Estrecho de Melaka (2020), en el cual investigan el comportamiento de la corrosión del acero de las tuberías en las aguas marinas naturales que rodean a Malasia peninsular como electrolito mediante pruebas electrónicas; además con el aumento de la salinidad y el aumento del sulfuro de sodio en el agua de mar, la velocidad de corrosión es menor (Mohd Asyadi Azama, 2020); también en la investigación sobre la corrosión en los oleoducto magistral (2020), en donde la investigación se basa en demostrar que el paso controlador de la corrosión es la aireación diferencial, lo que contribuye a una diferencia potencial significativa en la superficie del metal en contacto con las diferentes fases de la emulsión de petróleo –agua (Renatovich, 2020). Se han aplicado otras técnicas de estudio para la medición de la velocidad de corrosión de los metales como la técnica del ruido electrónico, Tafel, resistencia a la polarización a la polarización lineal, con las cuales se puede determinar la resistencia a las picaduras las cuales se verán presentes en el material que estará expuesto.

Para este caso puntual el cual se trata del estudio de la velocidad de corrosión del acero API 5L – X42 en inmersión de agua de mar (sintética) donde con esta investigación se brinda más información importante que complementa las demás investigaciones existentes. Este tema es interesante tratar, además de preparar los respectivos cupones que se estarán empleando para poder determinar la corrosividad y los factores de los cuales depende este fenómeno que ha estado presente en la vida de los materiales y más aún en la vida útil de los metales.

## 4. Metodología.

**Figura 1.**

*Metodología experimental implementada en el presente trabajo de grado.*



### 4.1 Proposición de secuencia para el desarrollo de la investigación.

Actividad 1: Revisión Bibliográfica. Para un desarrollo exitoso de este trabajo de grado se debe hacer una retroalimentación de todos los conceptos importantes de temas tales como velocidad de corrosión, SEM, DRX resistencia a la polarización, mecanismo de corrosión, acero al carbono, potenciodinámica y entre otros. Las fuentes bibliográficas que se tendrán en cuenta son artículos publicados, informes que permitirán la aclaración de dudas.

## 4.2 Materiales y preparación.

Actividad 1: Obtención de los cupones de acero y compuestos químicos.

Se procedió a adquirir cupones de acero al carbono provenientes de un proveedor, específicamente obtenidos de una sección cilíndrica correspondiente al acero API 5L-X42. Estos cupones fueron dimensionados a 2,3\*2,4\*0,43 cm y su estado inicial se ilustra en el Apéndice A. Posteriormente, se llevó a cabo un análisis de chispa para determinar la composición química del acero API 5L-X42, cuyos resultados se encuentran detallados en el apéndice B.

La obtención de compuestos químicos se realizó mediante dos fuentes principales: algunos fueron proporcionados por el laboratorio de Corrosión (GIC), mientras que otros fueron facilitados por la Escuela de Química. Esta selección estratégica de compuestos químicos se fundamenta en la necesidad de contar con sustancias específicas para llevar a cabo investigaciones y experimentos pertenecientes al estudio de la corrosión en el contexto de la ingeniería.

Actividad 2: Preparación de los cupones (desbaste) y el agua de mar sintética.

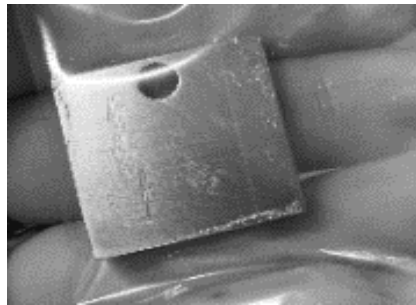
Se llevó a cabo la preparación de los cupones mediante un proceso de desbaste utilizando carburo de silicio con distintos tamaños de granulo (80, 120, 240, 320, 400 y 600). Cada cupón fue sometido a desbaste con cada número correspondiente de papel de carburo de silicio, con el propósito de lograr una superficie uniforme. Este proceso de desbaste contribuye significativamente a mejorar la calidad de la superficie de los cupones, permitiendo obtener resultados más precisos y prolongar la vida útil de las piezas.

Antes de realizar los ensayos, fue necesario preparar el agua de mar sintética, para lo cual se utilizaron diversos compuestos como NaCl, MgCl<sub>2</sub>, NaSO<sub>4</sub>, CaCl<sub>2</sub>, KCl, NaHCO<sub>3</sub>, KBr, H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>, SrCl<sub>2</sub> y NaF, cuyas composiciones se detallan en el Apéndice C. La preparación del agua de mar

sintética siguió la norma ASTM D1141-98 Standard *Práctica for Preparación of Substitute Ocean Water*. La salinidad resultante fue del 41.953% en 1000 ml de agua destilada, asegurándose de alcanzar la solubilidad total de los compuestos (Lake Products Company LLC, 2019). Este procedimiento es fundamental para replicar condiciones marinas simuladas y garantizar la validez de los ensayos de corrosión.

***Figura 2.***

*Superficie uniforme del acero API 5L–X42 después del proceso de desbaste.*



**4.3 Exposición de cada cupón en el ambiente simulado.**

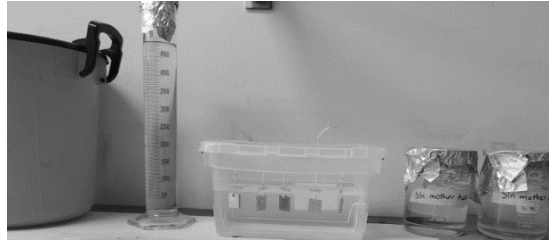
Se lleva a cabo en el laboratorio mediante la aplicación de procedimientos precisos y el uso de instrumentos especializados. Los cupones desbastados son previamente lavados con agua destilada y desengrasados con alcohol etílico para garantizar condiciones de superficie óptimas. A continuación, los cupones se colocan en contacto directo con el medio simulado, caracterizado por una salinidad aproximada del 41,953% y un pH que oscila entre 7,9 y 8,3. Este ambiente se mantiene durante un periodo máximo de 30 días.

Con el objetivo de analizar la velocidad de corrosión, se emplea un cupón de acero al carbono expuesto a diferentes intervalos de tiempo, específicamente 0, 7, 14, 21 y 30 días. La

elección de estos tiempos de exposición permite evaluar la progresión temporal del material frente a condiciones ambientales simuladas.

**Figura 3.**

*Proceso de inmersión de los cupones.*



#### **4.4 Operaciones con el potenciostato Gamry 600 en estudios electroquímicos.**

En la fase inicial de las operaciones, se procedió al ensamblaje de una celda electroquímica, donde se posicionó el cupón como electrodo de trabajo en la parte inferior, asegurándolo mediante un dispositivo roscado ajustable. En este arreglo, se incorporó agua de mar sintética en un crisol contenido en la celda. Los electrodos de referencia y contra electrodo empleados fueron un electrodo de Plata/Cloruro de plata (Ag/AgCl) y platino, respectivamente. Cada experimento se llevó a cabo utilizando el potenciostato Gamry 600, cuya operación se controló de manera remota mediante una computadora por medio del software Gamry Instruments Framework.

Previa a la configuración experimental, se efectuó una medición de masa para cada cupón de acero al carbono API 5L- X42, tanto con productos de corrosión como sin ellos, estableciendo así una línea base precisa para las mediciones subsiguientes. Este procedimiento meticuloso garantiza la fiabilidad y precisión de los datos recopilados durante las pruebas electroquímicas.

**Figura 4.**

*Montaje experimental.*



Actividad 1: La determinación del potencial de corrosión se llevó a cabo mediante pruebas individuales para cada cupón, en consonancia con los distintos periodos de exposición, utilizando el potenciostato Gamry 600. Estas pruebas se extendieron hasta alcanzar un estado estacionario observable en los registros electroquímicos. Paralelamente, se efectuó la misma evaluación en un cupón de cero días inmerso en agua de mar real, con el propósito de establecer un punto de comparación con el cupón de cero días expuesto al agua de mar sintética. Las condiciones específicas de operación para estas pruebas electroquímicas se detallan en el apéndice D.

Actividad 2: Estimación por la técnica de resistencia a la polarización. Se realizó la prueba para cada cupón según cada tiempo de exposición en el agua de mar sintética y para el cupón de cero días con agua de mar esto con la finalidad de poder realizar una comparación con el cupón de ceros días con el agua de mar sintética; esta prueba se realizó en el potenciostato Gamry 600 teniendo en cuenta la norma ASTM G59-97: (*Standard Test Method for Conducting Potenciodynamic Polarization Resistance Measurements*), con respecto al potencial de corrosión entre (-30mV - +30mV) y a una velocidad de barrido de 0,16mV/s (ASTM , 2023). Las condiciones de trabajo más específicas de esta prueba electrostática se presentan en el apéndice D.

Actividad 3: Estimación por la técnica potenciodinámica. Se realizó la prueba para cada cupón según cada tiempo de exposición en el agua de mar sintética y para el cupón de cero días con agua de mar esto con la finalidad de poder realizar una comparación con el cupón de ceros días con el agua de mar sintética; esta prueba se realizó en el potenciostato Gamry 600 teniendo en cuenta la norma ASTM G59 – 97 (*Standard Test Method for Conducting Potenciodynamic Polarization Resistance Measurements*). Con respecto a esta norma se llevó a cabo el estudio a una velocidad de barrido de 0,16mV/s (ASTM, 2023). Para observar el efecto del agua sintética se obtuvieron las curvas de Tafel utilizando el mismo espécimen bajo condiciones experimentales similares, excepto que este presentaba un tiempo de inmersión mayor en el medio acuoso. Para los ensayos con la técnica potenciodinámica se inició la curva a -500mV por debajo del potencial de corrosión y se finalizara a 1500mV por encima de dicho potencial. Las condiciones de trabajo más específicas de esta prueba electrostática se presentan en el apéndice D. Se Puede observar en el apéndice E la imagen de los cupones como quedan después de realizar esta prueba ya que es una prueba que se caracteriza por ser destructiva.

#### **4.5 Determinación y caracterización del acero.**

Actividad 1: Estimación por DRX (análisis cualitativo). Se llevó a cabo este análisis para caracterizar el acero API 5L – X42 por medio del producto de la corrosión obtenido a partir de los 5 cupones luego de estar expuestos al medio corrosivo, donde se obtuvo aproximadamente 1 gramo del producto de la corrosión del acero.

Actividad 2: Estimación por SEM. Con este método se determina la caracterización del producto de corrosión, donde se obtiene un análisis de la teoría estructural del cupón de acero API 5L- X42 a cero días y a los 30 días. De igual forma también se puede tener una imagen detallada de la superficie del material después de haberse sometido al medio salino.

## 5. Resultados.

En este capítulo, se procederá a presentar de manera detallada los resultados derivados de las descripciones expuestas en el capítulo precedente. Se llevará a cabo un estudio del material mediante técnicas específicas, entre las cuales se incluyen potenciodinámica, resistencia a la polarización, Difracción de Rayos X (DRX), Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) y análisis de pérdida de masa. Este enfoque multidisciplinario proporcionara una comprensión más rigurosa de los procesos corrosivos, permitiendo una evaluación pormenorizada de la evolución de la estructura y las propiedades del material en diferentes condiciones ambientales y a lo largo del tiempo.

Los cupones se analizaron en el siguiente orden:

- Cupón de acero API 5L-X42 P0 (cero días de inmersión).
- Cupón de acero API 5L-X42 P1 (siete días de inmersión).
- Cupón de acero API5L-X42 P2 (catorce días de inmersión).
- Cupón de acero API 5L-X42 P3 (veintiún días de inmersión).
- Cupón de acero API 5L-X42 P4 (treinta días de inmersión).
- Cupón de acero API 5L-X42 P0. A (cero días de inmersión, agua de mar).

### 5.1 Curvas Potenciodinámicas.

En la figura 5 realizada en Excel y también realizada manualmente en el programa Gamry Echem Analyst que se encuentra en el apéndice F, se puede observar las curvas de polarización potenciodinámicas obtenidas después de cada tiempo de inmersión en el agua de mar sintética

(0,7,14,21 y 30 días) y para cero días en agua de mar del caribe. En los tiempos 0,7,14, 21 y 30 se puede observar un desplazamiento del potencial de corrosión a valores más negativos con respecto al potencial de corrosión de referencia (cero días), lo que indica que, desde el punto de vista termodinámico, la resistencia a la corrosión del material disminuye gradualmente durante el proceso de corrosión, esto debido a la presencia de las sales presentes en la solución sintética, especialmente de los cloruros; debido a que con el paso del tiempo, estas sales promueven el aumento de la corrosión superficial, por lo cual el potencial se vuelve más negativo). La disminución del índice de corrosión  $I_{corr}$  a lo largo del tiempo se atribuye a la generación de productos corrosivos, como  $Fe_xO_y$  y  $FeOOH$ , que disminuyen a difusión de iones, como cloruro ( $Cl^-$ ), hidróxido ( $OH^-$ ) y sulfato ( $SO_4^{2-}$ ) hacia la superficie del acero; este fenómeno conduce a una reducción en la velocidad de corrosión. Las densidades de corrosión más bajas indican que los sitios activos están obstruidos, principalmente por películas de óxido, lo que contribuye a la protección del acero al limitar la exposición a agentes corrosivos y, por ende, disminuir la tasa de deterioro del material. (Natalya V. Likhanova, Noel Nava, O.Olivares - Xometl, M.A. Dominguez, P Arrellanes- Lozada, Irina V.Lijanova, Janette Aeeiola- Morales, Luis Lartundo - Rojas., 2018)

Si se compara el cupón en agua de mar sintética con el cupón en agua de mar original (caribe) para ceros días de inmersión, se puede observar que este último tuvo un potencial de corrosión más negativo, lo que indica que el agua de mar original contiene, posiblemente, otras sales disueltas, o mayor concentración de sales que las usadas en el agua de mar sintética además de microorganismos, bacterias, etc. que disminuyen su resistividad y, por lo tanto, aumentan su corrosividad con respecto al acero API 5L- X42.

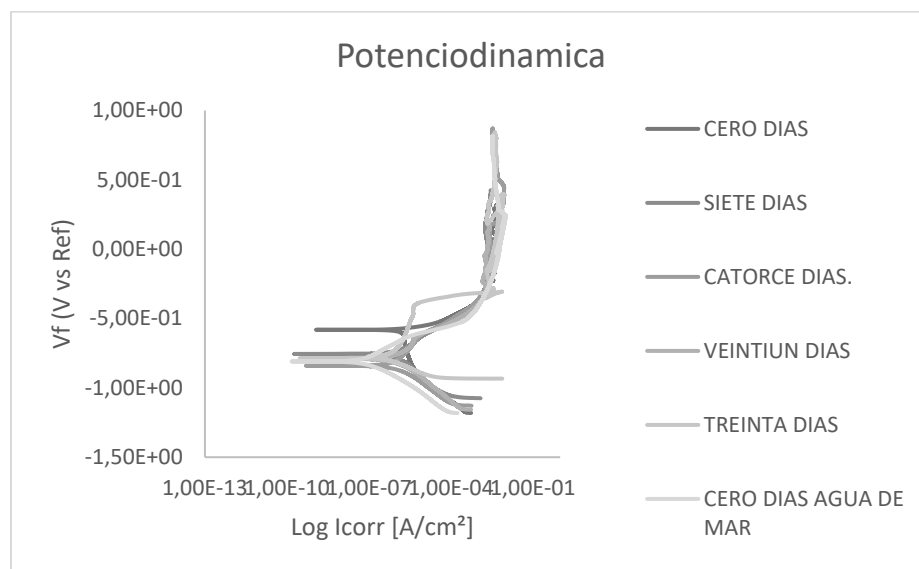
Todas las curvas potenciodinámicas mostraron una cinética por transferencia de carga a excepción de los ceros días (repetida dos veces) que mostró un comportamiento mixto, es decir,

una reducción del oxígeno presente, luego un control por transferencia de masa hacia la superficie del material, y, por último, un control por activación que es la reducción del agua a hidrógeno.

En cuanto a la parte anódica de las diferentes curvas se observa inestabilidad en la densidad de corriente, a medida que el potencial aumenta, lo que indicaría un proceso corrosivo de formación de una película de óxidos y otros productos de corrosión que se disocian con el tiempo y luego se forman nuevamente sobre la superficie del metal.

### Figura 5.

*Curvas de potenciodinámica de los cupones para cada tiempo de inmersión.*

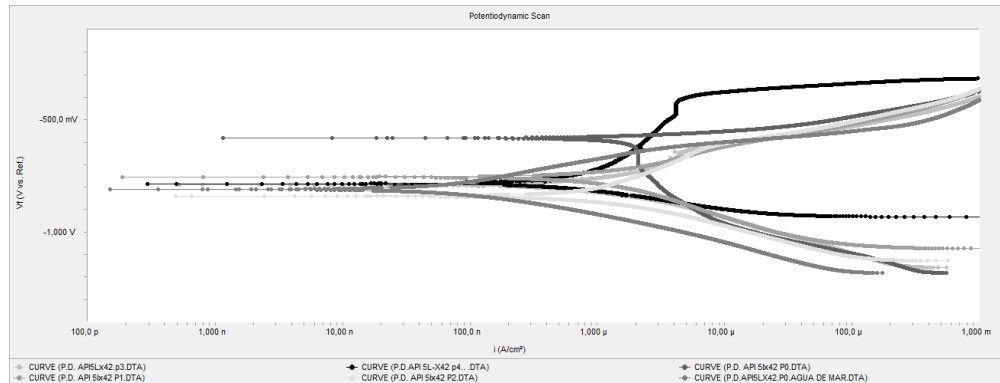


### 5.2 Curvas de Tafel.

Las curvas Tafel se observan en la figura 6 las cuales fueron trazadas usando el programa Gamry Echem Analyst para diferentes tiempos de exposición, cabe anotar que, para cada tiempo se realizaron dos ensayos.

**Figura 6.**

*Curvas de potenciodinámica a los diferentes tiempos.*



En la figura 6 se evidencia una disminución en el potencial de corrosión para los cupones en los periodos de 0, 7 y 14 días, reflejando un desplazamiento del potencial de corrosión hacia valores más negativos con respecto al potencial de corrosión de referencia (cero días). Este fenómeno sugiere una mayor susceptibilidad termodinámica al proceso corrosivo, indicando un deterioro en la resistencia del material frente a la corrosión. Por otro lado, los cupones expuestos durante 21 y 30 días exhiben un cambio en la tendencia, con un potencial de corrosión menos negativo en comparación con el día 14 días. Este cambio sugiere una posible formación de una capa de corrosión, indicando una variación en la resistencia a la corrosión.

Con relación a la evolución de la densidad de corrosión durante los periodos de inmersión de 0, 7, 14, 21, 30 días, se destaca una tendencia decreciente a lo largo del tiempo. Este comportamiento puede atribuirse a la formación de compuestos corrosivos mencionados anteriormente como el  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y  $\text{FeOOH}$ , estos compuestos desempeñan un papel crucial al dificultar la difusión de iones de cloruro ( $\text{Cl}^-$ ), hidróxido ( $\text{OH}^-$ ) y sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) hacia la interfaz del acero. Como consecuencia de esta obstrucción, se observa una ligera disminución en la velocidad de

corrosión. Las densidades de corrosión más reducidas sugieren la presencia de obstrucciones en sitios activos, mayormente atribuibles a la formación de películas de óxido. (Natalya V. Likhanova, Noel Nava, O. Olivares - Xometl, M.A. Dominguez, P Arrellanes- Lozada, Irina V. Lijanova, Janette Aeeiola- Morales, Luis Lartundo - Rojas., 2018). Este cambio se atribuye a un fenómeno en el cual los componentes tensoactivos presentes en el electrolito inducen una reducción en la corriente resultante del sistema, implicando una influencia de estos componentes en la actividad corrosiva del medio.

Para determinar la velocidad de corrosión se utilizó la norma ASTM 59 -97: *Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements*; donde las gráficas relacionan el logaritmo de la densidad de corrosión en una reacción electroquímica con el potencial (Amin et al., 2009). Es importante tener en cuenta en este tipo de métodos que al menos una de las ramas de las curvas de polarización debe estar bajo la curva de activación (McCafferty, 2005).

**Tabla 1.**

*Valores de las pendientes anódicas y catódicas, densidad de corrosión, potencial de corrosión y cálculo velocidad de corrosión por (Tafel).*

Muestras	$\beta_A$ [mV/décadas]	$\beta_C$ [mV/décadas]	$I_{corr}$ [ A/cm <sup>2</sup> ] (*10 <sup>-6</sup> )	$E_{corr}$ [ mV]	Corrosion Rate [mpy]
<b>P0</b>	57	0	4,17	-584	<b>1,9173</b>
<b>P1</b>	94	139	0,83	-753	<b>0,3794</b>
<b>P2</b>	133	89	0,58	-841	<b>0,2663</b>
<b>P3</b>	97	95	0,57	-793	<b>0,2620</b>
<b>P4</b>	143	72	0,38	-788	<b>0,1724</b>
<b>P0. A</b>	90	73	0,048	-804	<b>0,0223</b>

En la figura 7 se puede observar como la velocidad de corrosión disminuye a medida que pasa el tiempo de inmersión de los cupones en el agua de mar sintética y la velocidad de corrosión para cero días en el agua de mar del caribe.

### Figura 7.

*Velocidad de corrosión en los diferentes días de inmersión en el agua de mar sintética.*



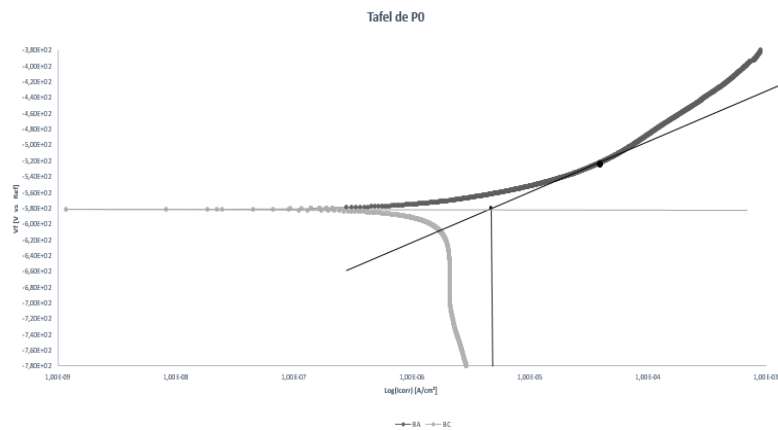
### ➤ Cupón P0.

En la figura 8 se presenta el análisis de la curva de polarización (Tafel) para el cupón expuesto inicialmente al agua de mar sintética. El proceso de oxidación/corrosión se inicia a sobrepotenciales por encima del potencial de corrosión. Como se observa en la tabla 1, se puede apreciar que el potencial de corrosión es el más positivo, y la velocidad de corrosión calculada con la ec.3 es mayor en comparación con los otros periodos de exposición. A partir de este punto, el material se mueve hacia potenciales más negativos y una densidad de corriente más o menos constante. Se puede observar en la figura que en la zona catódica hay un comportamiento mixto donde la parte curva presenta una reducción de hidrogeno ( $H^+$ ) y en la parte un poco lineal presenta una reducción de oxígeno en el agua donde hay menos para reaccionar, por tanto el potencial del

corrosión es más positivo con respecto a los demás tiempos de inmersión (Juan David Santos Martinez, Duberney H. Ladino, Jose Wilmar Calderon Hernandez, Neusa A. Falleiros, Hercílio Gomes de Melo, 2022).

### Figura 8.

*Comportamiento de polarización potenciodinámica (Tafel) para cupón de cero días.*

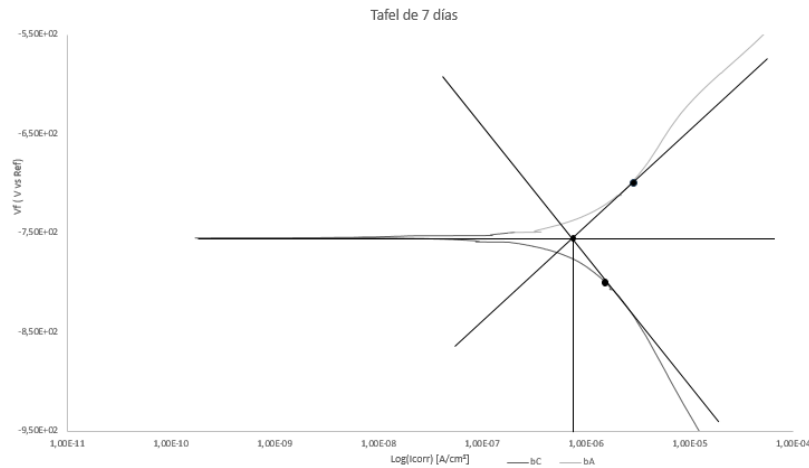


### ➤ Cupón P1.

Analíticamente por medio de la prueba Tafel (figura 9) se pudo determinar que el potencial de corrosión de este cupón presenta un desplazamiento hacia valores más negativos con respecto al cupón P0 debido al paso del tiempo, por ende, termodinámicamente empieza a hacer posiblemente más susceptible a la corrosión. En la tabla 1, se puede observar que después de siete días de inmersión la densidad de corrosión y la velocidad de corrosión calculada con la ec.3 disminuyen con respecto al día cero esto se debe al tiempo de exposición al que está expuesto; esto posiblemente se debe a que en el día 7 empiezan a formarse productos de corrosión en la superficie del cupón de acero.

**Figura 9.**

*Comportamiento de polarización potenciodinámica (Tafel) para cupón de siete días.*

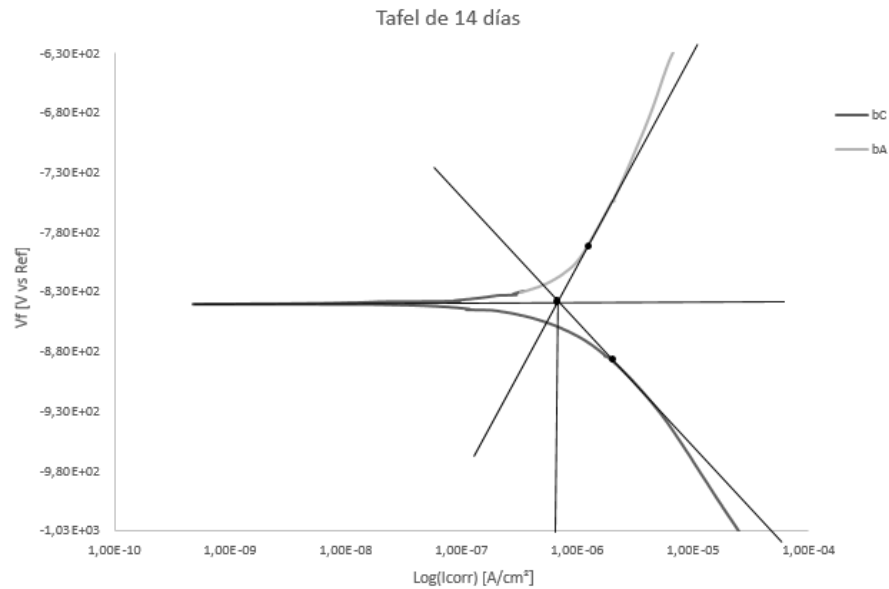


➤ **Cupón P2.**

En comparación con los cupones anteriores (P0 y P1) el tiempo de exposición para este cupón su potencial se desplaza hacia un valor más negativo con respecto a los demás tiempos de inmersión es decir que se desplaza hacia un potencial más activo debido al proceso de oxidación que implica la pérdida de electrones por parte del cupón, lo cual está favoreciendo el proceso de corrosión (Natalya V. Likhanova, Noel Nava, O.Olivares - Xometl, M.A. Dominguez, P Arrellanes- Lozada, Irina V.Lijanova, Janette Aeeiola- Morales, Luis Lartundo - Rojas., 2018), por tanto, termodinámicamente la resistencia de corrosión del material disminuye gradualmente. Los datos obtenidos se pueden observar en la tabla 1 donde la velocidad de corrosión se calculó con la ec.3. La cinética de corrosión es por transferencia de carga de acuerdo con las pendientes Tafel, similar a lo observado a los 7 días de inmersión.

**Figura 10.**

*Comportamiento de polarización potenciodinámica (Tafel) para cupón de catorce días.*

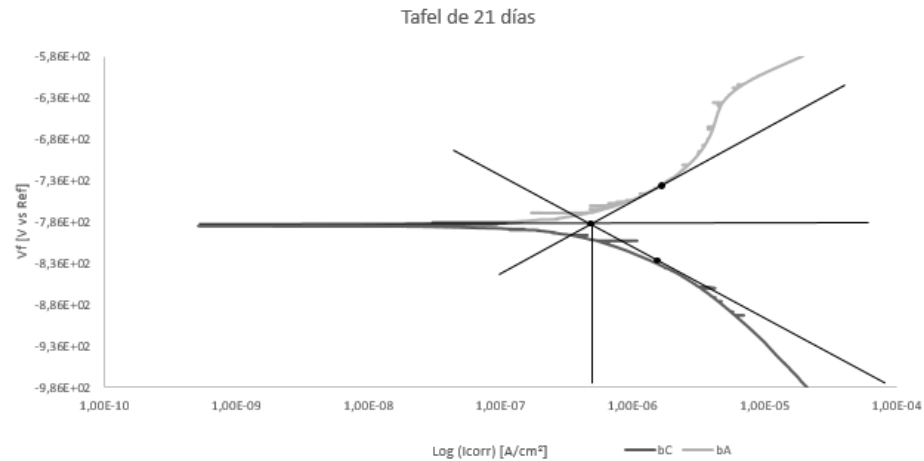


➤ **Cupón P3.**

Para un tiempo de inmersión de 21 días en comparación con 0,7 y 14 días el potencial de corrosión tiende a ser más positivo es decir se desplaza a valores menos activos donde indica una ligera mayor resistencia a la corrosión; esto representa cambios en la cinética de los procesos anódicos y catódicos por corrosión, por lo cual la densidad de corrosión y la velocidad de corrosión disminuyen como se observa en la tabla 1.

**Figura 11.**

*Comportamiento de polarización potenciodinámica (Tafel) para cupón de veintiún días.*



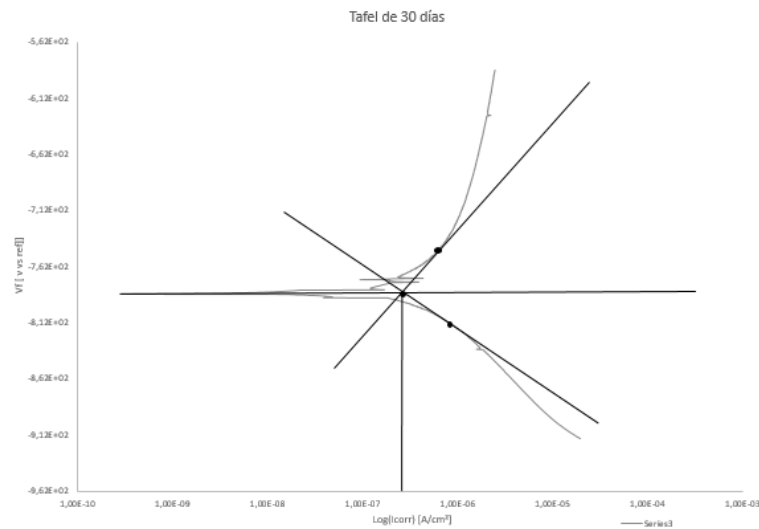
➤ **Cupón P4.**

En la inmersión de 30 días con respecto a la de 21 días como se puede observar en la tabla 1, su potencial de corrosión se desplaza hacia un valor más positivo, así mismo disminuye la densidad de corrosión disminuye con respecto a los demás tiempos de inmersión debido a la formación de compuestos corrosivos ; estos productos dificultan la difusión de iones tales como (cloro, hidróxido y sulfato ) hacia la superficie del acero lo que conduce a una reducción de la velocidad de corrosión donde la posible formación de productos de corrosión puede influir en la difusión de oxígeno en esa capa (Natalya V. Likhanova, Noel Nava, O.Olivares - Xometl, M.A. Dominguez, P Arrellanes- Lozada, Irina V.Lijanova, Janette Aeciola- Morales, Luis Lartundo - Rojas., 2018).

La cinética de corrosión tanto a 21 días como a los 30 días es por transferencia de carga tal y como lo indican las pendientes Tafel determinadas para el material.

### Figura 12.

*Comportamiento de polarización potenciodinámica (Tafel) para cupón de treinta días.*

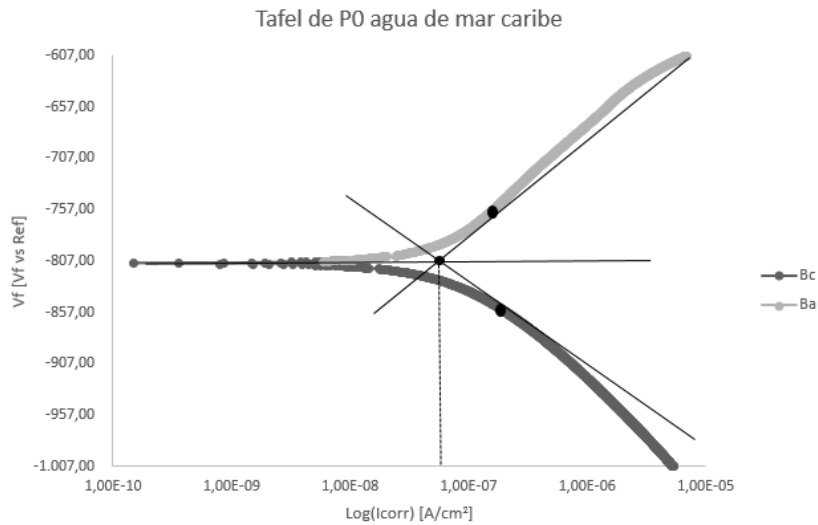


### ➤ Cupón P0. A.

Al acero API 5L- X42 se le realizaron las pruebas electroquímicas con el agua de mar (recogida del mar Caribe), para comparar su comportamiento con respecto al agua de mar sintética ver tabla 1. La diferencia notable se debe posiblemente que en el agua de mar recogida se tienen otras sales disueltas, diferencias de salinidad y microorganismos que contribuyen a modificar la reacción de oxidación sobre la superficie del acero. La cinética de corrosión sigue siendo netamente por transferencia de carga.

**Figura 13.**

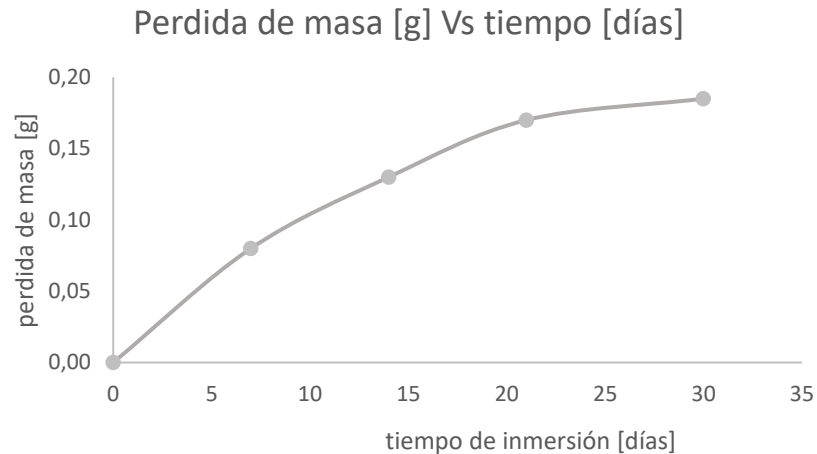
*Comportamiento de polarización potenciodinámica (Tafel) para cupón de cero días para agua de mar.*

**5.3 Ensayo por pérdida de masa.**

La pérdida de masa en las piezas metálicas resulta de la transformación de estas en productos de corrosión, donde la corrosión en la superficie del material se disuelve en la solución, exponiendo nuevamente el material a un proceso corrosivo, ver apéndice I. Los productos de corrosión, típicamente compuestos por óxidos, hidróxidos o sales, exhiben calores molares superiores al metal original. En consecuencia, a medida que el metal se corroe y se convierte en estos productos, se experimenta una disminución en la masa del material. Este fenómeno subraya la corrosión como un proceso que incide directamente en la integridad de los materiales, comprometiendo su resistencia y durabilidad estructural.

**Figura 14.**

*Variación de la pérdida de masa con el tiempo para el acero API 5L -X42.*



Como se puede observar en la gráfica a medida que avanza en el tiempo y aumenta el tiempo de inmersión para cada pieza, la pérdida de masa aumenta, esto se debe a la relación que tiene la pérdida de masa con la densidad de corrosión, a partir de esto se puede estudiar que a menor densidad de corriente implica menos corrosión, lo que conduce a una pérdida de masa más baja en el periodo de tiempo dado. Pero de P1-P4 al aparecer la capa corrosiva de protección y al estar sumergidas en el medio de agua de mar sintética, ocurre una dilución de la capa de polvillo de corrosión que se forma en la superficie del acero por lo que se deduce que estos experimentan varias veces la corrosión directa en su superficie. Por medio de la pérdida de más se puede observar en la tabla 2 la velocidad de corrosión calculada con la ec.4 disminuye con el tiempo de inmersión y la pérdida de masa aumenta.

**Tabla 2.**

*Cálculos de pérdida de peso de cada cupón según el tiempo de inversión y la velocidad de corrosión por este método.*

Muestra	t [días]	t [horas]	Peso del acero con el producto de corrosión [g]	Peso del acero sin el producto de corrosión [g]	Pérdida de masa [g]	Dimensiones h*L*A [cm]	Área [cm <sup>2</sup> ]	Corrosion Rate [mpy]
P0	0	0	20,26	20,26	0,00	2,3*2,4*0,43	15,082	
P1	7	168	17,77	17,69	0,08	2,3*2,4*0,43	15,082	13,8939
P2	14	336	19,47	19,34	0,13	2,3*2,4*0,43	15,082	11,2888
P3	21	504	19,80	19,63	0,17	2,3*2,4*0,43	15,082	9,8415
P4	30	720	16,09	15,9	0,19	2,3*2,4*0,43	15,082	7,4969

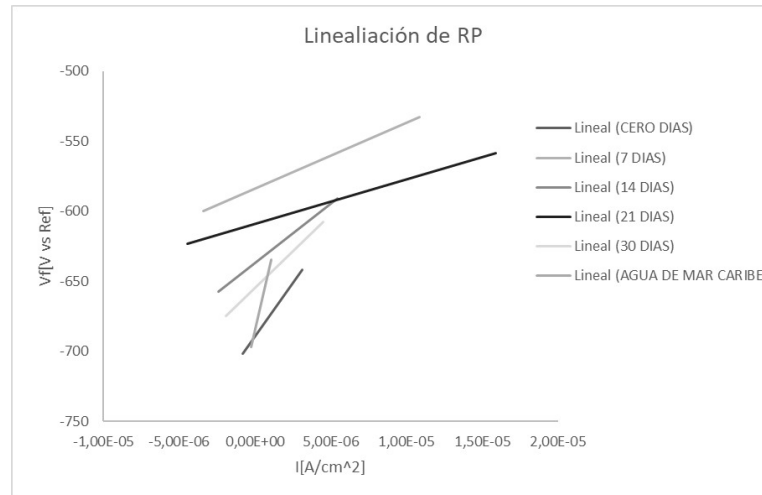
#### 5.4 Resistencia a la polarización.

En la gráfica 14 y apéndice H, se puede observar las curvas de RP obtenidas por la técnica de corriente directa para cada uno de los tiempos de inmersión en el agua de mar sintética incluyendo la del agua de mar caribe, en donde los resultados para cada uno de los tiempos permiten establecer los comportamientos de la velocidad de corrosión como se presenta en tabla del apéndice E.

Se observa que a medida que pasa el tiempo de inmersión la resistencia a la polarización va disminuyendo ligeramente lo que indica que la doble capa eléctrica del acero es más susceptible a la corrosión; cabe anotar que el cupón sumergido en agua de mar caribe mostró una resistencia a la polarización más alta comprada con los demás cupones lo que afirma los resultados obtenidos con las curvas potenciodinámicas.

**Figura 15.**

Curvas de resistencia a la polarización linealizada a los diferentes tiempos.

**Tabla 3.**

Cálculo de resistencia de polarización por RP.

Muestras	I <sub>corr</sub> [ A/cm <sup>2</sup> ](*10 <sup>-6</sup> )	E <sub>corr</sub> [mV]	RP [Ω/cm <sup>2</sup> ](*10 <sup>3</sup> )
P0	0	-686,6	21,89
P1	3,98	-585,1	6,11
P2	2,16	-637,1	10,69
P3	1,52	-654,2	14,26
P4	1,46	-432,5	13,63
P0.A	0,21	-681,8	83,91

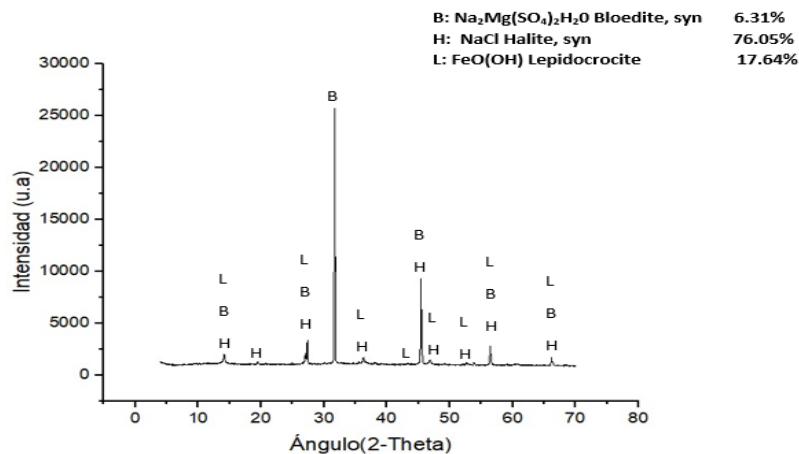
### 5.5 Difracción de rayos X (DRX).

En la figura 16, se presentan los patrones de difracción obtenidos por DRX a partir de los cupones expuestos al medio. La configuración y la intensidad de los picos en la gráfica proporcionan información detallada sobre los compuestos formados durante la exposición. Se identifica la presencia de Na<sub>2</sub>Mg(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O (Bloedite), NaCl (Halite) y FeO(OH) (Lepidocrocite).

Los dos primeros son compuestos formados a partir de los elementos mayoritarios los cloruros presentes en el medio corrosivo, mientras que el tercero es un hidróxido de hierro que potencialmente contribuye a la formación de una posible capa protectora sobre la superficie del material en algunos momentos del proceso corrosivo. Este análisis detallado de los patrones de difracción proporciona una visión de los productos de corrosión generados y sus implicaciones en la corrosión del material.

### Figura 16.

*Patrones de difracción de rayos X del producto de corrosión obtenido a partir de los cinco cupones expuestos al medio simulado.*



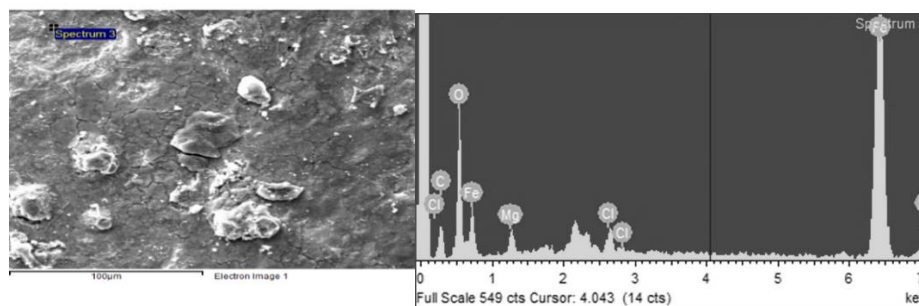
### 5.6 Microscopia Electrónica de Barrido.

Se procedió con la caracterización mediante el uso del microscopio electrónico de barrido (SEM). Este procedimiento permitió la visualización y determinación de los daños en la superficie del material a nivel microscópico, así como la identificación de la morfología asociada a dichos daños. Simultáneamente, se analizaron y caracterizaron los productos de corrosión generados como consecuencia de la exposición a la que se expuso el material.

El análisis cuantitativo a través de espectroscopia EDS se muestran en la figura 17, (cupón de 30 días). En este espectro cualitativo EDS se identifican elementos como C, O, Mg, Cl y Fe. La presencia de Fe se atribuye a su contenido en una capa de óxido de hierro, mientras que Mg y Cl están presentes en la solución a la que se expuso el cupón durante un periodo de 30 días.

### Figura 17.

*Espectro cualitativo EDS de cupón de treinta días para el acero API 5L - X42.*

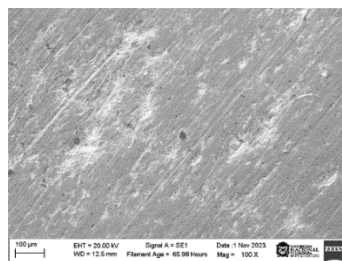


*Nota.* Adatado del Laboratorio de Microscopia de la Universidad Nacional Sede Medellín.

En la figura 18, se presenta la morfología del cupón de cero días del acero API 5L – X42, donde se observa las marcas de pulido, además, se destaca una morfología homogénea en la superficie, señalando una condición inicial sin evidencia de alteraciones corrosivas.

### Figura 18.

*Resultados SEM del cupón de cero días de inmersión del acero API 5L -X42 a una magnificación de 100x.*

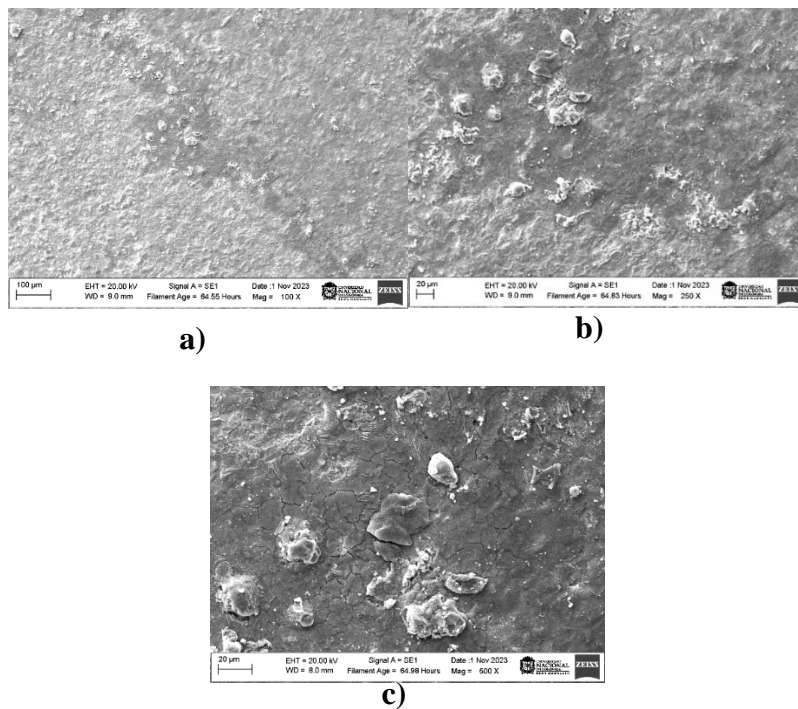


*Nota.* Adaptado del Laboratorio de Microscopia de la Universidad Nacional Sede Medellín.

En la figura 19, se presenta la morfología del acero API 5L-X42, donde las líneas de pulido han disminuido notablemente, siendo reemplazado por una capa de óxido que indica una corrosión uniforme y homogénea en el cupón. Esta capa de óxido posiblemente es muy delgada, evidenciada por las mínimas trazas de líneas de pulido, especialmente notables en la morfología a 100x.

Al examinar la morfología a 250x, se distinguen con mayor claridad los productos de corrosión que se forman sobre la capa, indicando un engrosamiento lento de la película. Las grietas observadas denotan que esta capa está experimentando un crecimiento que resulta en fracturas debidas a su propia expansión. A 500x, se muestra con mayor detalle el fracturamiento de la película, lo que produce, posteriormente, un desprendimiento de la capa, para nuevamente empezar a crecer una nueva película.

**Figura 19.** Resultados SEM del cupón de treinta días de inmersión del acero API 5L -X42, a) morfología de 100x, b) morfología de 250x y c) morfología de 500x.



Nota. Adaptado del Laboratorio de Microscopia de la Universidad Nacional Sede Medellín.

## 6. Conclusiones.

Los resultados derivados de las pruebas electroquímicas en el acero API 5L-X42 exhiben una marcada evolución en su potencial de corrosión a lo largo del tiempo, manifestada por un desplazamiento hacia valores más negativos. Este fenómeno implica una mayor actividad electroquímica del material, sugiriendo, desde el punto de vista termodinámico, una susceptibilidad a los procesos corrosivos. Concomitantemente, se observó una disminución en la resistencia a la corrosión a medida que el aumenta el tiempo de inmersión, como evidencia en las imágenes del Apéndice E, indicando una mayor predisposición del acero a la formación de productos de corrosivos.

La densidad de corriente mostro una tendencia decreciente, atribuible a la formación de productos de corrosión que actuaron como obstáculos para la difusión de iones de cloruro, hidróxido y sulfuro hacia la superficie del acero. Este fenómeno es posible a la obstrucción de los sitios activos por la formación de películas de oxido que ejerce un control determinante sobre la cinética de corrosión. La conclusión técnica es que el comportamiento observado puede atribuirse a la dinámica de formación y eliminación de óxidos en la interfaz metal- electrolito, destacando la influencia critica de las condiciones ambientales y la evaluación temporal en el desempeño corrosivo del acero API 5L-X42.

Por medio de la caracterización del acero API 5L-X42 por medio de la técnica de DRX se observaron compuestos que se formaron a partir de algunos elementos del agua de mar sintética ( $\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  Bloedite, NaCl Halite) esto se debe a que la corrosión formada en los cupones posiblemente sucede mayoritariamente por la presencia de este cloruro en el agua sintética, por

otro parte hubo formación de FeO(OH) Lepidocrocite que puede favorecer una posible formación de película protectora.

Por medio de la técnica SEM-EDS se pudo observar para el cupón de 30 días la presencia de C, O, Mg, Cl y Fe, los cuales contribuyen a la formación de los diferentes productos de corrosión. Por medio de diferentes aumentos (100x, 250x y 500x) se observó que la morfología de los productos de corrosión va cambiando sobre la superficie del material; es decir, de compacta a agrietada indicando el crecimiento y ruptura de la capa de óxido que afecta directamente la degradación del acero.

En esta investigación se puede concluir que el acero API 5LX-42 se comporta satisfactoriamente en soluciones de agua de mar sintética, debido a sus valores de  $R_p$ , Tafel y velocidades de corrosión, que, junto con otras técnicas de protección, sería un buen material a bajo costo para desempeño en medios marinos.

## **7. Recomendaciones.**

Para investigaciones futuras relacionados con proyectos de corrosión en medios marinos se recomienda contemplar abarcar otras variables además del tiempo, como podrían ser analizar la afectación que sufre el acero a causa de la dinámica del agua, los rangos pH, los perfiles de temperatura y presión, entre otros.

### Referencias Bibliográficas

- A. Robador, V. Brüchert, B.B. Jørgensen. (2009). The impact of temperature change on the activity and community composition of sulfate-reducing bacteria in arctic versus temperate marine sediments. *Environ. Microbiol.* 11(7), 1692-1703.
- A.I.M. Ismail, A.M. El-Shamy. (2009). Engineering behaviour of soil materials on the corrosion of mild steel. *Appl. Clay Sci.* 42(3-4), 356-362.
- A.U. Malik, S. Ahmad, I. Andijani, S. Al-Fouzan. (1999). Corrosion behavior of steels in Gulf seawater environment. *Desalination* 123(2-3), 205-213.
- America Petroleum Institute. (Diciembre de 2012). Obtenido de <https://www.api.org/products-and-services/standards/important-standards-announcements/standard-51>
- ASM International. (2003). *ASM Metals Handbook Corrosion: Fundamentals Testing and Protection*. Estados Unidos de America 13A.
- ASTM . (14 de Junio de 2023). Obtenido de <https://www.astm.org/g0059-97r20.html>
- ASTM. (22 de Octubre de 2012). Obtenido de <https://www.astm.org/g0031-72r04.html>
- ASTM. (2015). *ASTM*. Obtenido de <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/9824/9911d9d5f76a4dc69e2bb57d54a3c399/ASTM-G3-89-1999-.pdf>
- ASTM. (2020). *ASTM*. Obtenido de <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/9824/9911d9d5f76a4dc69e2bb57d54a3c399/ASTM-G3-89-1999-.pdf>
- ASTM. (27 de Febrero de 2023). Obtenido de <https://www.astm.org/g0102-89r15e01.html>
- Asyadi Azam, M., Sukarti, S., Zaimi, M. (2020). Corrosion behavior of API-5L-X42 petroleum/natural gas pipeline steel in South China Sea and Strait of Melaka seawaters. *ELSEVIER*.
- Cambridge, U. o. (Agosto de 2009). *DoITPoMS, Teaching and Learning Packages, Kinetics of Aqueous Corrosion*. Obtenido de Disponible en: [https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/aqueous\\_corrosion/index.php](https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/aqueous_corrosion/index.php)
- Cerdán, C. E. (Marzo de 2023). Caracterización de la pasividad del acero inoxidable UNS N08031 en ácido fosfórico contaminado mediante técnicas electroquímicas. Valencia, Valencia, España.
- COVER SYSTEMS. (12 de Enero de 2021). Obtenido de <https://www.coversystems.net/definicion-de-corrosion/>

- ECCA. (2011). *The Basics of Corrosion Technical paper Contents Introduction*. Obtenido de <https://prepaintedmetal.eu/repository/downloads/1.%20The%20Basics%20of%20Corrosion.pdf>
- E.S.D.D. Oliveira, R.F.D.C. Pereira, I.R.D. Melo, M.A.G.D.A. Lima, S.L. Urtiga Filho. (2017). Corrosion behavior of API 5L X80 steel in the produced water of onshore oil recovery facilities, *Mater. Res.* 20, 432-439.
- Galbarro, H. R. (s.f.). *Ingemecanica*. Obtenido de Estudio y Clasificación de los Aceros: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn101.html>
- García, A. S. (2009). Montaje y puesta a punto de un potenciostato comercial para llevar a cabo medidas de corrosión electroquímica. Getafe, Madrid, España.
- I Saefuloh, N Kanani, Y Rukmayadi, M I Noor, Y Yusuf, I Setiawan, S ula, S Abdullah, H A Notonegoro. (2020). The study of corrosion behaviour api 5l steel in sea water using immersion test method. *IOPScience*.
- Industriapedia*. (26 de Julio de 2022). (Qué es Tasa de corrosión) Recuperado el 19 de Agosto de 2023, de <https://industriapedia.com/que-es-tasa-de-corrosion/>
- Industriapedia*. (22 de julio de 2022). (Qué es Difracción de rayos X (XRD)) Recuperado el 5 de septiembre de 2023, de <https://industriapedia.com/que-es-difraccion-de-rayos-x-xrd/>
- Industriapedia*. (27 de Julio de 2022). (Qué es la resistencia a la polarización) Recuperado el 2023 de Agosto de 13, de [https://industriapedia.com/que-es-resistencia-a-la-polarizacion/#:~:text=La%20resistencia%20de%20polarizaci%C3%B3n%20\(Rp, reacciones%20qu%C3%ADmicas%20en%20los%20electrodos](https://industriapedia.com/que-es-resistencia-a-la-polarizacion/#:~:text=La%20resistencia%20de%20polarizaci%C3%B3n%20(Rp, reacciones%20qu%C3%ADmicas%20en%20los%20electrodos).
- Innovation, A. (25 de Mayo de 2021). *Atria Innovation*. Obtenido de <https://www.atriainnovation.com/ensayo-de-corrosion-con-potenciostato/#:~:text=cantidad%20de%20informaci%C3%B3n%3A-.Potencial%20de%20corrosi%C3%B3n,y%20por%20tanto%20se%20corroer%C3%A1>.
- ITALICA. (2020). *¿Que tipos de corrosión existen?* Obtenido de <https://italica.pe/wp-content/uploads/2020/09/Tipos-de-corrosi%C3%B3n.pdf>
- Juan David Santos Martinez, Duberney H. Ladino, Jose Wilmar Calderon Hernandez, Neusa A. Falleiros, Hercílio Gomes de Melo. (2022). Corrosion characterization of new low manganese microalloyed X65 steels in sour and NON-SOUR synthetic seawater. *ELSEVIER*, 3198 - 3214.
- Lake Products Company LLC*. (2019). Obtenido de [https://www.lakeproductscompany.com/products/sea-salt-astm-d1141-98?gclid=Cj0KCQjwIPWgBhDHARIsAH2xdNcuePITMOI-VUsLepG-stc4AN1VdKuXxHkVikHLGAIhS6ITiyD-WdAaAnA7EALw\\_wcB](https://www.lakeproductscompany.com/products/sea-salt-astm-d1141-98?gclid=Cj0KCQjwIPWgBhDHARIsAH2xdNcuePITMOI-VUsLepG-stc4AN1VdKuXxHkVikHLGAIhS6ITiyD-WdAaAnA7EALw_wcB)
- M.A. Azam, M.F. Ibrahim, M. Zaimi. (2015). Corrosion analysis of carbon steel pipeline: effect of different sulfuric acid concentrations. *Applied Mechanics & Materials* 699 , 215-220.

- M.Madrigal-Cano, L. Hernández-Maya, J.M. Hallen, M. Corrales-Luna, E.M. Arce-Estrada, T.Le Manh. (2018). Model for the correlation between anodic dissolution resistance and crystallographic texture in pipeline steels. *Materials* 11(8).
- Mohd Asyadi Azama, S. S. (2020). Corrosion behavior of API-5L-X42 petroleum/natural gas pipeline steel in South China Sea and Strait of Melaka seawaters. *ELSEVIER*, 115, 104 - 654.
- Natalya V. Likhanova, Noel Nava, O.Olivares - Xometl, M.A. Dominguez, P Arrellanes- Lozada, Irina V.Lijanova, Janette Aeeiola- Morales, Luis Lartundo - Rojas. (2018). Corrosion Evaluation of Pipeline Steel API 5L X52 in partially deaerated Produced Water with High Chloride Content. *International Journal of ELECTROCHEMICAL SCIENCE*, 7949 - 7967.
- OCTAL. (s.f.). Obtenido de <https://www.octalacero.com/tuberial-api-5l-x42>
- Q. Liu, W. Wu, Y. Pan, Z.Y. Liu, X.C. Zhou, X.G. Li. (2018). Electrochemical mechanism of stress corrosion cracking of API X70 pipeline steel under different AC frequencies. *Constr. Build. Mater.* 171, 622-633.
- Renatovich, A. C. (2020). Corrosión en la superficie interior del oleoducto magistral. *Centro de Investigacion de Petróleo*, 11, 33-39.
- Revie. (2011). Manual de corrosión de Uhlig. *Wiley & Sons*.
- Revie y Uhlig. (2008). *Corrosión y control de la corrosión: una introducción a la ciencia e ingeniería de la corrosión*. EE. UU: John Wiley & Sons.
- Roberge, P.R. (2000). Handbook of Corrosion Engineering. *McGraw-Hill, New York*, 333 - 351, 1093.
- Rubén Darío Cuadrado, María Del Rosario Del Valle Alonso, Yelitza Del Carmen AramendiZ . (2003). Diseño y construcción de un equipo trazador de curvas potencioestáticas y potenciodinámicas para pruebas de laboratorio que determinen el comportamiento de materiales en medios corrosivos. Cartagena de indias, Colombia.
- Salazar-Jiménez, J. A. (2015). Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales. *Tecnología en Marcha*.
- Schweitzer P. A. (2009). Fundamentals of corrosion: mechanisms, causes, and preventative methods. *Tecnología En Marcha*, 28(3).
- S.S. Prabha, R.J. Rathish, R. Dorothy, G. Brindha, M. Pandiarajan, A. Al-Hashem, S. Rajendran. (2014). Corrosion problems in petroleum industry and their solution,. *Eur. Chem.Bulletin* 3(3), 300-307.
- Tubería de acero al carbono API 5L X42*. (03 de Marzo de 2023). Recuperado el 13 de Agosto de 2023, de <https://www.htpipe.es/Casos/conocimiento/tuberia-de-acero-al-carbono-api-5l-x42.html>
- Udelar. (2020). Clasificación de electrodos. Montevideo, Uruguay.

*Universidad de Burgos.* (04 de marzo de 2020). (Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)) Recuperado el 01 de septiembre de 2023, de <https://www.ubu.es/parque-cientifico-tecnologico/servicios-cientifico-tecnicos/microscopia/microscopia-electronica-de-barrido-meb>

UNLP. (2016). *UNLP.* Recuperado el 2023 de Agosto de 19 , de [https://www1.ing.unlp.edu.ar/catedras/Q0854/descargar.php?secc=0&id=Q0854&id\\_inc=23680](https://www1.ing.unlp.edu.ar/catedras/Q0854/descargar.php?secc=0&id=Q0854&id_inc=23680)

## Apéndices.

### Apéndice A.

*Cupones de acero al carbono API 5L -X42 suministrados por el proveedor.*



### Apéndice B.

*Composición química del acero API 5L – X42.*

	C %	S%	Mn %	P%	S%	Cr%	Mo%	Ni%	Cu%	Al%
<b>1</b>	0.208	0.290	1.135	0.0077	<0.150	0.021	<0.010	0.014	0.023	0.034
<b>2</b>	0.197	0.287	1.150	0.0079	<0.150	0.021	<0.010	0.014	0.023	0.035
<b>3</b>	0.186	0.283	1.131	0.0071	<0.150	0.022	<0.010	0.014	0.023	0.035
<b>Ø</b>	<b>0.197</b>	<b>0.287</b>	<b>1.139</b>	<b>0.0076</b>	<b>&lt;0.150</b>	<b>0.021</b>	<b>&lt;0.010</b>	<b>0.014</b>	<b>0.023</b>	<b>0.034</b>
<b>σ</b>	0.011	0.0035	0.010	0.00042		0.00071		0.00071		0.00071
<b>υ</b>	5.584	1.220	0.878	5.526		3.381		5.071		2.088

	As %	B%	Bi %	Ca%	Co %	Mg %	N%	Nb%	Pb%	Sb%
<b>1</b>	0.0053	<0.0010	0.028	<0.0	0.0078	0.0060	0.071	<0.0010	<0.010	0.027
<b>2</b>	0.0056	<0.0010	0.033	<0.0	0.0083	0.0057	0.033	<0.0010	<0.010	0.029
<b>3</b>	0.0052	<0.0010	0.029	<0.0	0.0085	0.0062	0.028	<0.0010	<0.010	0.029

$\emptyset$	<b>0.0054</b>	<b>&lt;0.0010</b>	<b>0.030</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0082</b>	<b>0.0060</b>	<b>0.044</b>	<b>&lt;0.0010</b>	<b>&lt;0.010</b>	<b>0.028</b>
$\sigma$	0.00021		0.0026		0.00036	0.00025	0.024			0.0012
$\nu$	3.889		8.667		4.390	4.167	54.55			4.286
	<b>Sn %</b>	<b>Ta%</b>	<b>Ti %</b>	<b>V%</b>	<b>W %</b>	<b>Zn %</b>	<b>Zr%</b>	<b>Se%</b>		<b>Fe%</b>
<b>1</b>	<0.0050	<0.030	0.0039	<0.0050	<0.010	0.0045	0.0028	<0.0050		97,94
<b>2</b>	<0.0050	<0.030	0.0041	<0.0050	0.011	0.0049	0.0033	<0.0050		97.93
<b>3</b>	<0.0050	<0.030	0.0036	<0.0050	0.010	0.0044	0.0028	<0.0050		97.97
$\emptyset$	<b>&lt;0.0050</b>	<b>&lt;0.030</b>	<b>0.0039</b>	<b>&lt;0.0050</b>	<b>&lt;0.010</b>	<b>0.0046</b>	<b>0.0030</b>	<b>&lt;0.0050</b>		<b>97.95</b>
$\sigma$			0.00025		0.00071	0.00026	0.00029			0.021
$\nu$			6.410		7.100	9.667	9.667			0.021

**Apéndice C.***Composición química de agua de mar sintética.*







<b>Composición</b>	<b>Mezcla sal-mar (%)</b>	<b>Sustituto de solución de agua de mar (g/l)</b>
NaCl	58.49	24,53
MgCl <sub>2</sub> – 6H <sub>2</sub> O	26.46	5.2
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	9.75	4.09
CaCl <sub>2</sub>	2.765	1.16
KCl	1.645	0.695
NaHCO <sub>3</sub>	0.477	0.201
KBr	0.238	0.101
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	0.071	0.027
SrCl <sub>2</sub> – 6H <sub>2</sub> O	0.095	0.025
NaF	0.007	0.003

**Apéndice D.***Condiciones de trabajo para las pruebas electroquímicas.*

<b>Parámetro</b>	<b>Resistencia a la polarización</b>	<b>Potenciodinámica (Tafel)</b>
<b>Potencial inicial (V vs E<sub>ocp</sub>)</b>	-0.03	-0.5
<b>Potencial final (V vs E<sub>ocp</sub>)</b>	0.03	1.5
<b>Velocidad de barrido (mV /s)</b>	0.167	0.167
<b>Periodo de muestreo (s)</b>	1	1
<b>Densidad (g/ cm<sup>3</sup>)</b>	7.84	7.84
<b>Peso equivalente</b>	27.92	27.92

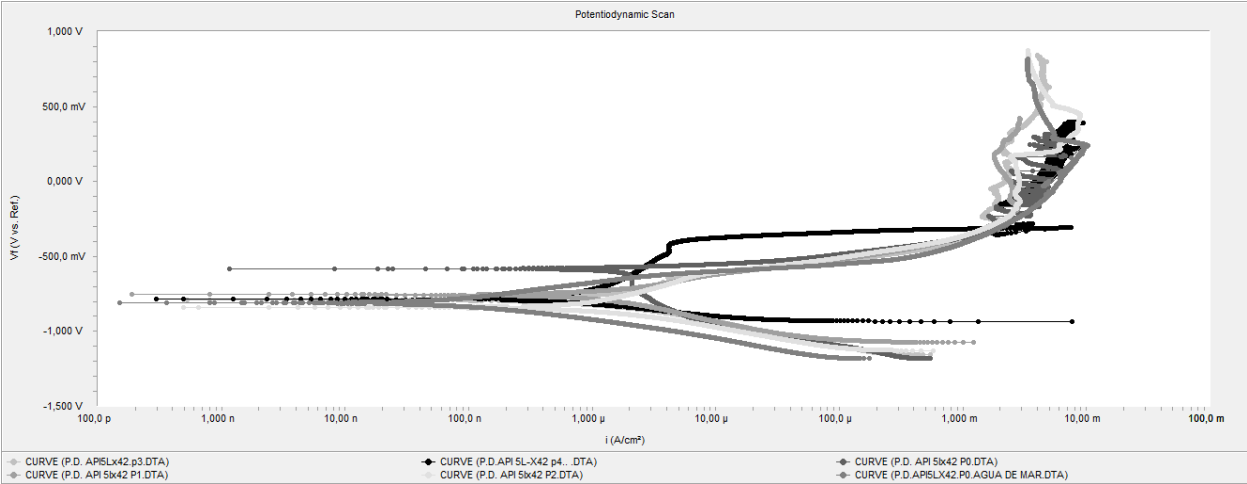
**Apéndice E.**

*Cupones después de realizada la prueba potenciodinámica.*

a) Cupón de cero días.	b) Cupón de siete días.
	
c) Cupón de catorce días.	d) Cupón de veintiún días.
	
e) Cupón de treinta días.	f) Cupón cero días (agua de mar).
	

**Apéndice F.**

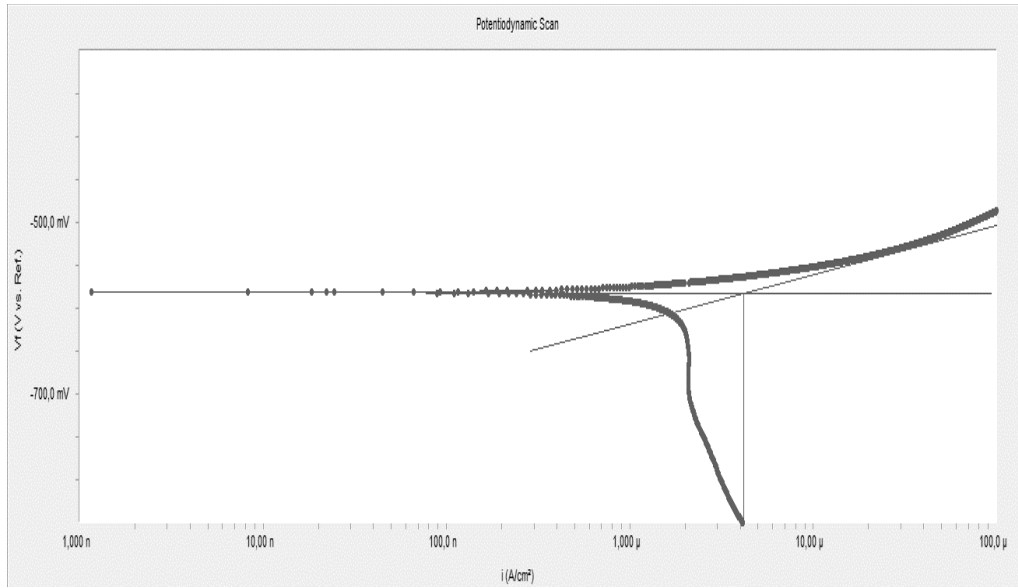
*Curvas de potenciodinámica para los diferentes tiempos de inmersión*



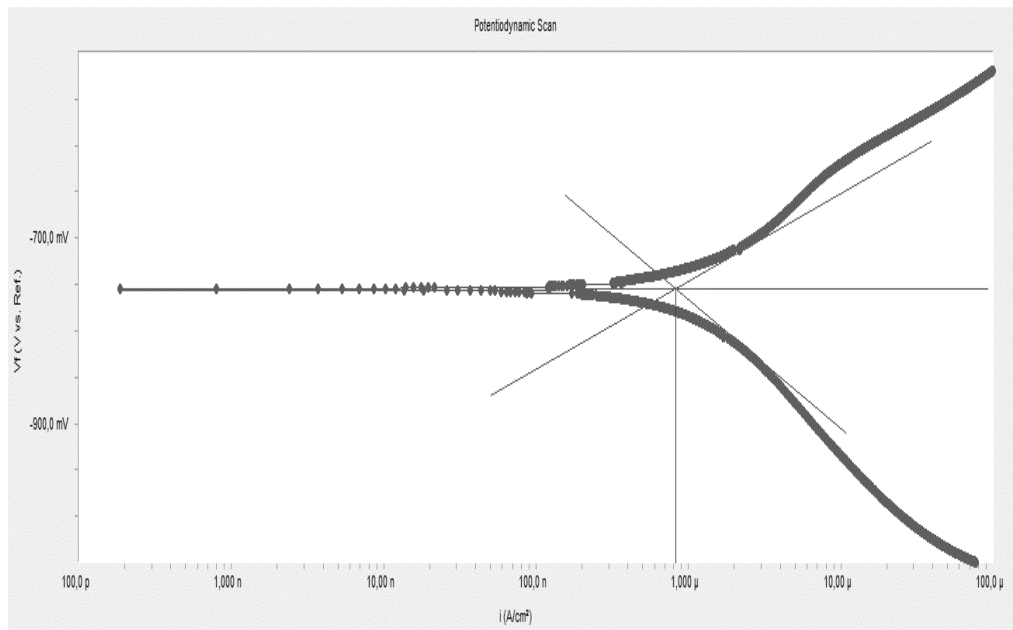
**Apéndice G.**

*Comportamiento de polarización potenciodinámica (Tafel).*

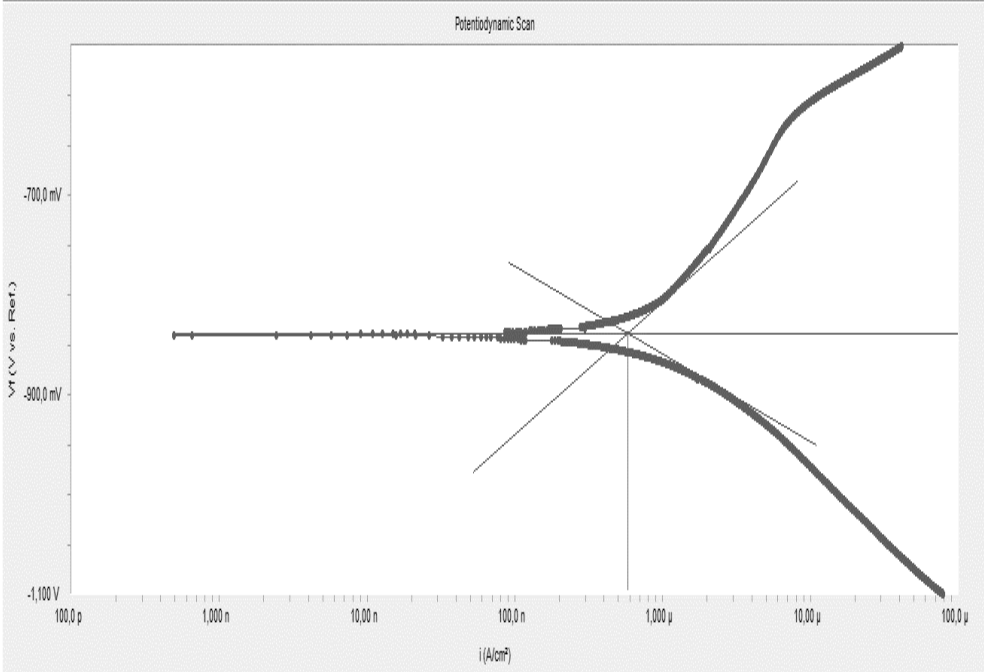
a) Cupón de cero días.



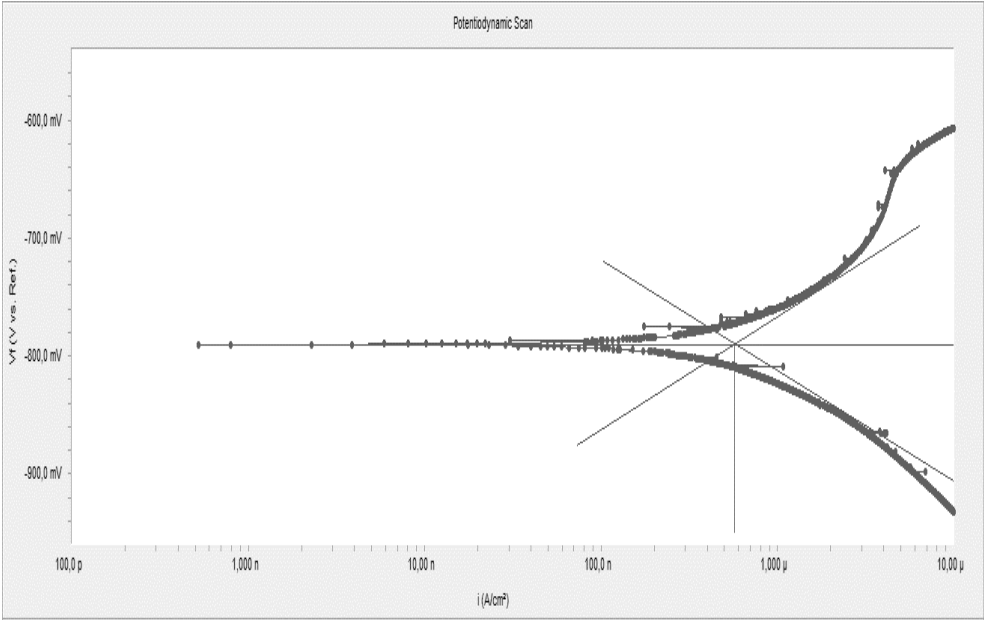
b) Cupón de siete días.



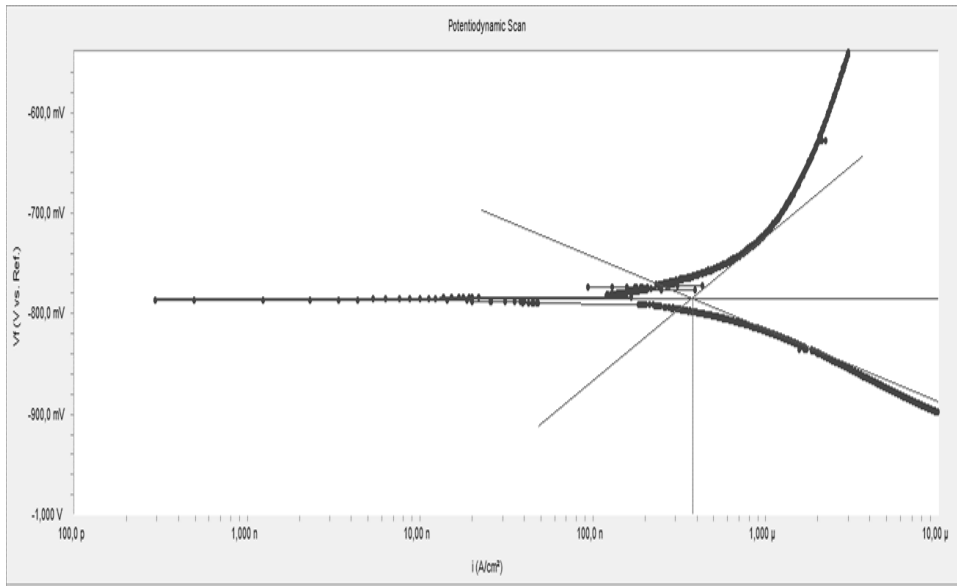
c) Cupón de catorce días.



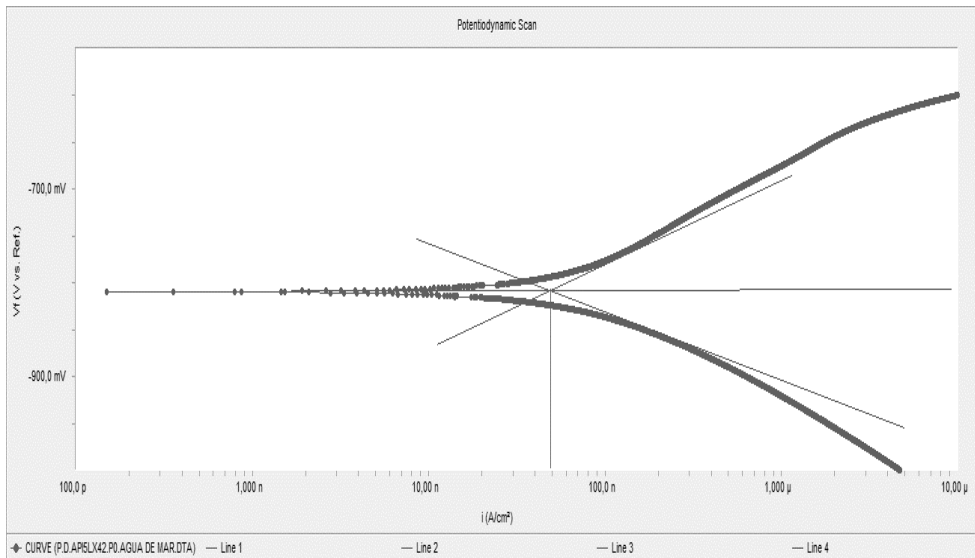
d) Cupón de veintiún días.



e) Cupón de treinta días.

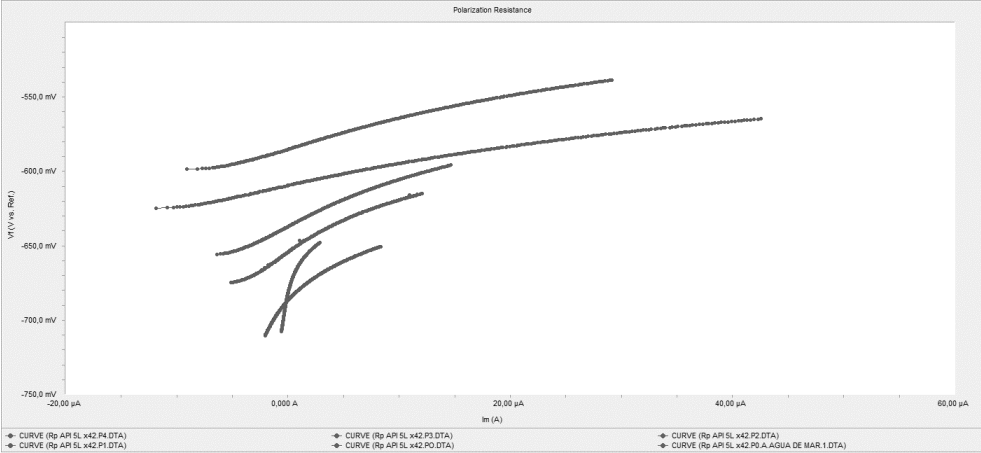


f) Cupón de cero días de agua de mar del caribe.



**Apéndice H.**

*Curvas de resistencia a la polarización a los diferentes tiempos.*



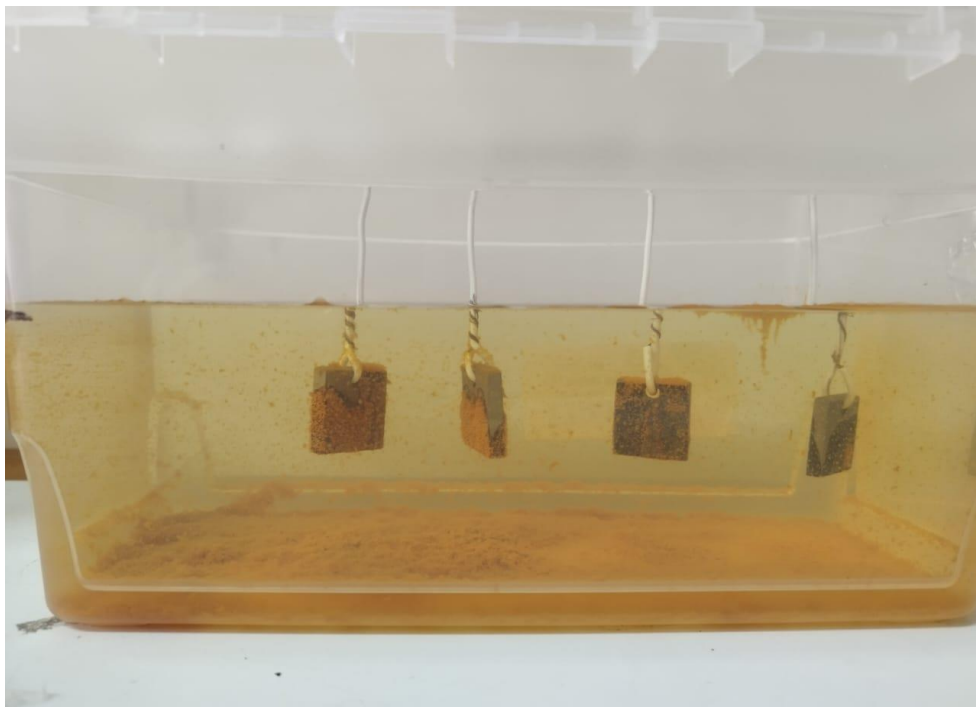
**Apéndice I.**

*Pérdida de masa de los cupones por inmersión.*

*a) Primer día de inmersión de los cupones*



*b) Séptimo día de inmersión de los cupones*



*c) Veintiún días de inmersión de los cupones.*



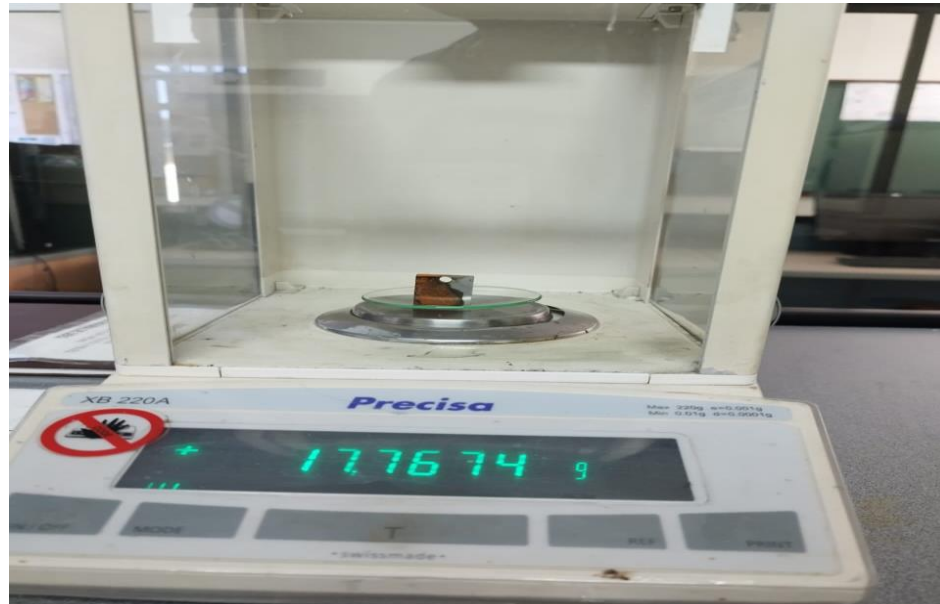
*d) Pérdida de masa total recolectada de los cupones por dilución.*



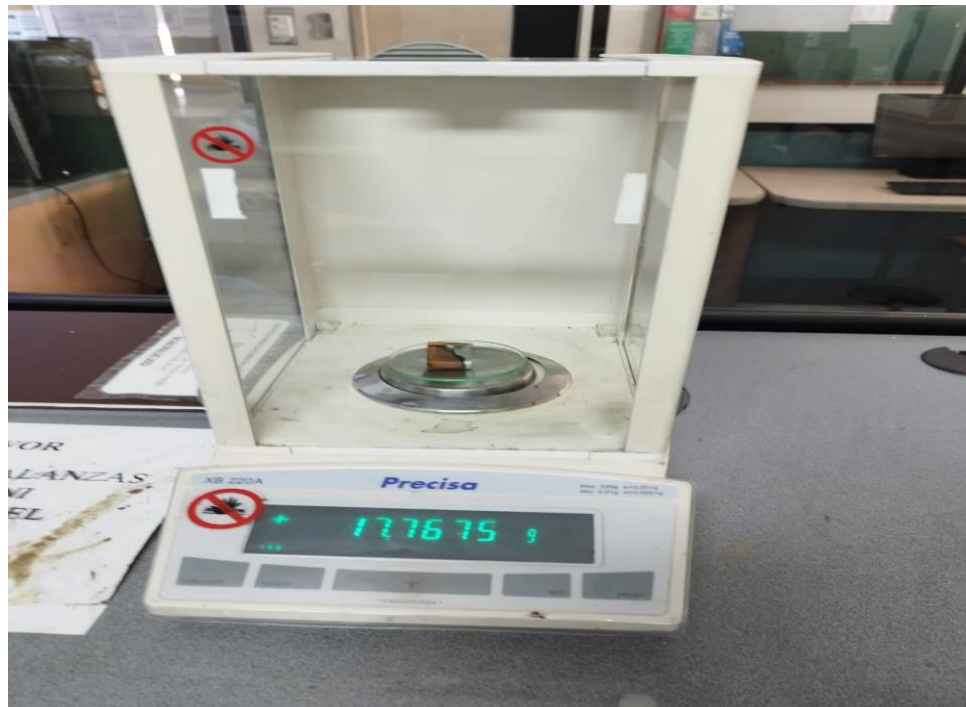
**Apéndice J.**

*Registro de cuantitativo de peso de los cupones para el cálculo de la pérdida de masa.*

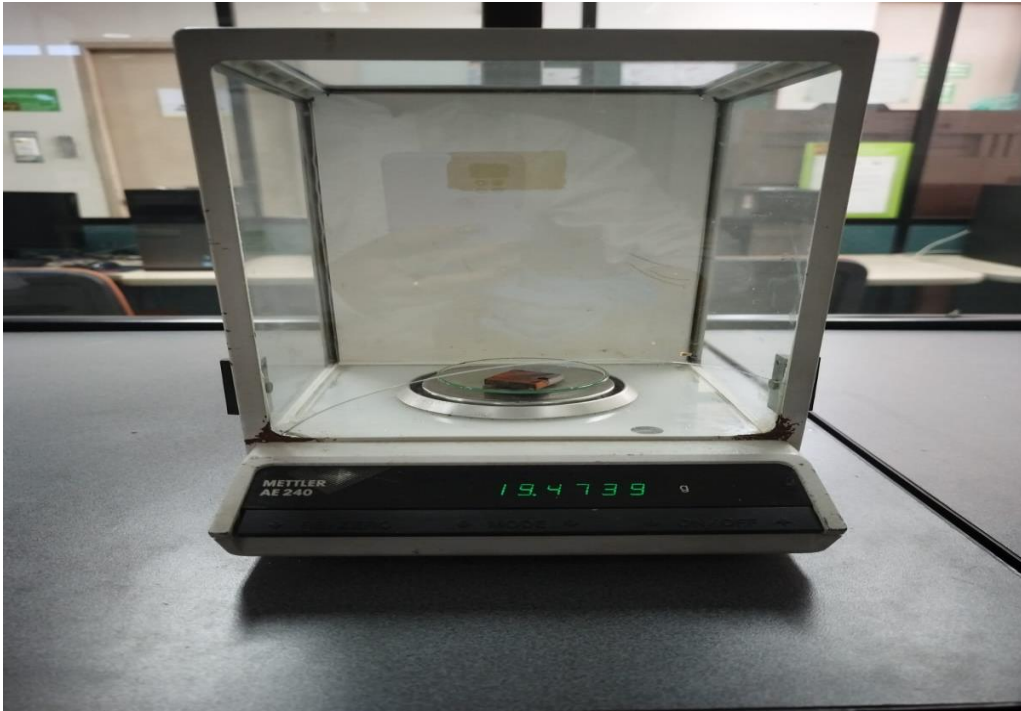
*a) Registro de peso de cupón con siete días de inmersión.*



*b) Registro de peso del cupón con catorce días de inmersión.*



*c) Registro del peso del cupón con veintiún días de inmersión.*



*d) Registro de peso del cupón con treinta días de inmersión.*

