

TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE COACALCO

RECUPERACIÓN DE CEFALEXINA COMO CONTAMINANTE EMERGENTE POR MEDIO DE POLARIZACIÓN CON ELECTRODO DE ALUMINIO

TESIS

Para obtener el título de:

INGENIERA QUÍMICA

Con especialidad en Petroquímica Secundaria

PRESENTA:

SAMANTHA GISELLE LÓPEZ AGUILAR

201821349

ASESORA INTERNA:

DRA. MARÍA YESENIA DÍAZ CÁRDENAS

ASESORA EXTERNA:

DRA. VICTORIA BUSTOS TERRONES

COACALCO DE BERRIOZÁBAL, EDO.MÉX. ABRIL, 2024

Este trabajo fue realizado en el Laboratorio de Fenómenos de Superficies e Interfaces del Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp) dependiente de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM), en el Laboratorio de Tecnología Ambiental de Investigación dependiente de la Universidad Politécnica de Morelos (UPEMOR) y en el Laboratorio de usos múltiples dependiente del Tecnológico de Estudios Superiores de Coacalco (TESCo), bajo la dirección del de la Dra. Victoria Bustos Terrones (UPEMOR) y de la Dra. María Yesenia Díaz Cárdenas (TESCo) y en colaboración del Dr. Jorge Uruchurtu Chavarín (CIICAp).

Este trabajo participó como proyecto de divulgación de la ciencia en un congreso nacional, en modalidad cartel (Ver ANEXO).

Dedicatoria

Este proyecto va dedicado a mis padres, quienes han sido mi ejemplo a seguir, además de ser mi sustento para llevar a cabo este logro en mi vida y poder formarme como una profesional, por lo cual les estoy eternamente agradecida.

Sam

Agradecimientos

Agradezco por asumir la dirección de este proyecto, por su apoyo, sugerencias y por el tiempo brindado:

Dra. María Yesenia Díaz Cárdenas

Dra. Victoria Bustos Terrones

Agradezco por el apoyo recibido, tiempo, conocimiento y experiencia durante el desarrollo de esta investigación:

Dr. Jorge Uruchurtu Chavarín

Agradezco su generosidad al proporcionar recursos y materiales para llevar a cabo la investigación:

Dr. René Guardián Tapia

Mtra. Angelica Monserrat Sánchez Ponce

Brandon Alberto Suárez Contreras

Vanesa Viviana Lomas Gutiérrez

ÍNDICE

Dedicatoria	3
Agradecimientos.....	4
CAPÍTULO I: GENERALIDADES DEL PROYECTO	10
Resumen	11
Introducción	12
Justificación.....	14
Planteamiento del problema	15
Antecedentes	16
Objetivos	18
Objetivo general:	18
Objetivos específicos:	18
Hipótesis.....	19
Alcances y limitaciones.....	19
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	20
1. Antibióticos	21
1.1. Cefalosporinas.....	22
1.1.1. Cefalexina.....	25
2. Aluminio.....	27

3.	Corrosión.....	29
3.1.	Termodinámica de la corrosión.....	29
3.1.1.	Diagramas de Pourbaix	30
3.2.	Cinética de la óxido-reducción.....	33
4.	Técnicas electroquímicas	35
4.1.	Voltamperometría cíclica	36
4.2.	Ruido electroquímico	40
5.	Espectrofotometría UV-Visible.....	41
	CAPÍTULO III: DESARROLLO.....	45
	Electrodo de trabajo	47
	Preparación del electrolito.....	47
	Pruebas de voltamperometría cíclica.....	47
	Pruebas potencioestáticas (potencial constante)	48
	Espectrofotometría UV-Visible.....	49
	Microscopía óptica	50
	CAPÍTULO IV: RESULTADO	51
1.	Estudios de la superficie metálica	52
1.1.	Pruebas electroquímicas	52
1.1.1.	Voltamperometría cíclica	52
1.2.	Pruebas potencioestáticas.....	56

2.	Estudios y análisis del electrolito	57
2.1.	Espectrofotometría UV-Visible.....	57
2.2	Micrografías ópticas	58
3.	Estudio de los estados de la molécula de cefalexina	59
CONCLUSIONES		61
Conclusiones experimentales		62
Recomendaciones y sugerencias para trabajos futuros		62
Competencias desarrolladas		62
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		64
ANEXO		74

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Estructura química de los antibióticos beta-lactámicos.	23
Figura 2.	Estructura química de la cefalexina	26
Figura 3.	Estructura cristalina centrada en las caras	28
Figura 4.	Diagrama de Pourbaix para el aluminio	32
Figura 5.	Voltamograma correspondiente a una prueba de voltamperometría cíclica	37
Figura 6.	Voltamogramas a diferentes velocidades de barrido, donde se observa que los picos de reducción presentan diferencia en el tamaño, dependiendo de la velocidad	38
Figura 7.	Representación de la construcción de una celda electrolítica para llevar a cabo una prueba de voltamperometría	39

Figura 8.Regiones del espectro electromagnético	41
Figura 9.Espectro de longitud de onda	42
Figura 10.Representación gráfica de la metodología para el desarrollo del proyecto	46
Figura 11.Prueba de voltamperometría cíclica en potenciostato a temperatura ambiente	48
Figura 12.Prueba potenciostática a temperatura ambiente	49
Figura 13.Prueba UV-Vis en proceso en espectrofotómetro	49
Figura 14.Prueba de microscopía electrónica del aluminio después de su tratamiento electroquímico	50
Figura 15.Voltamogramas de dos ciclos del aluminio en barrido de dos ciclos en ausencia y en presencia de 100 ppm de cefalexina en agua residual sintética a temperatura ambiente y pH 4	53
Figura 16.Voltamogramas de dos ciclos del aluminio en barrido de dos ciclos en ausencia y en presencia de 100 ppm de cefalexina en agua residual sintética a temperatura ambiente y pH 7	54
Figura 17.Voltamogramas de dos ciclos del aluminio en barrido de dos ciclos en ausencia y en presencia de 100 ppm de cefalexina en agua residual sintética a temperatura ambiente y pH 9	55
Figura 18.Recolección de muestras durante el monitoreo en diferentes tiempos del tratamiento de una prueba potenciostática a pH básico y potencial fijo de -310 mV por dos horas, con la tarjeta prototipo elaborada por los alumnos de Sistemas Computacionales del TESCO	56
Figura 19.Monitoreo por espectrofotometría UV-vis de la prueba de ruido en dominio de potencial a -310 mV durante 2 horas en presencia de 100 ppm de cefalexina	58
Figura 20.Comparación de micrografías de las superficies del electrodo de aluminio en dos diferentes tiempos de tratamiento con potencial de -310 mV a) aluminio puro antes de tratamiento, b) 2 horas y c) 2 días en presencia de cefalexina en medio básico	59

Figura 21.Diferentes estados de ionización de la cefalexina, según en el pH en las que se encuentra la cefalexina	59
Figura 22.Propuesta de mecanismo de interacción aluminio-cefalexina	60

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.Clasificación de las cefalosporinas	24
---	----

CAPÍTULO I: GENERALIDADES DEL PROYECTO

Resumen

En este estudio se propone la remoción de cefalexina de un agua residual sintética, por medio de un proceso de adsorción utilizando un electrodo metálico bajo la aplicación de un potencial fijo de -310 mV. Por tanto, se presentan los resultados de la captación de cefalexina mediante métodos electroquímicos; la investigación presente se realizó utilizando un electrodo de material convencional, en este caso aluminio y la técnica de curvas voltamperométricas a diferentes valores de pH para localizar las condiciones específicas de interacción entre la cefalexina y el aluminio. Una vez identificado el potencial necesario para favorecer la adsorción, se realizaron pruebas potencioestáticas, con las cuales se logró estudiar la interacción cefalexina-aluminio. Los resultados se analizaron mediante espectrofotometría de UV-Visible y microscopía óptica. Según los resultados anteriores, la cefalexina mostró ser adsorbida en la superficie del aluminio, lo que pudo ser corroborado en las micrografías ópticas y los cambios observados en los espectros de UV-Visible.

Palabras clave: remoción de cefalexina, adsorción, electroquímica, aluminio.

Introducción

Los contaminantes emergentes son compuestos de diferente origen y naturaleza encontrados en las aguas residuales, estos corresponden a una amplia gama de sustancias químicas, dentro de las cuales se encuentran los productos farmacéuticos, como analgésicos, antihipertensivos, antidepresivos, antiepilépticos y los más preocupantes, los antibióticos, ya que por sus funciones en animales y humanos que aunque han sido favorables para la salud para tratar infecciones, ha conllevado a un incremento de producción y consumo, aunado a que el organismo no los metaboliza completamente, en consecuencia se han visto grandes cantidades de descarga de estos productos en cuerpos de agua, en donde estudios hasta la fecha han mostrado evidencia de residuos de fármacos en el medio ambiente, y ocasionando una creciente resistencia bacteriana (Jiménez, 2011; Tejada, C, *et al*, 2014). Como se menciona anteriormente, se presentan dos factores para que diversos productos lleguen a un entorno acuoso; el primer factor es que un gran número de medicamentos son utilizados alrededor del mundo para tratar diversas enfermedades y padecimientos, tanto en humanos como de uso veterinario y, el segundo factor es que, de acuerdo con la naturaleza de nuestro metabolismo, los medicamentos son excretados mediante el sistema urinario y digestivo. Consecuentemente, la disposición final de estos termina en las aguas residuales.

De acuerdo con el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), los contaminantes emergentes son vertidos en el agua y en el ecosistema, ya que no son eliminados por los tratamientos convencionales en el tratamiento de aguas residuales. Además, sus concentraciones van cada vez más en aumento (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2015). Por ejemplo, dentro de los diferentes tipos de medicamentos, el consumo de antibióticos en todo el mundo ha

aumentado un 65% solo en los últimos 15 años, y se prevé que aumente exponencialmente su consumo para el año 2030 (Klein, E.Y, *et al*, 2018).

De acuerdo con el contexto anterior, los contaminantes emergentes representan importantes riesgos al medio ambiente y a la salud (Saji, V. S, 2010,). En el caso de los antibióticos una de las preocupaciones actuales es la resistencia que las bacterias pueden llegar a generar al estar en contacto con éstos en el ecosistema, ya que, según datos del 2019, aproximadamente 700 mil pacientes al año mueren a causa de infecciones provocadas por bacterias resistentes a los antibióticos (Lesho, E.P & Laguio-Vila, M, 2019).

Particularmente, un antibiótico de primera generación, la cefalexina que pertenece a la familia de las cefalosporinas (Suárez, C., & Gudiol, F. 2009), es usado como agente antibacteriano ya que combate las infecciones respiratorias, urinarias, de oídos, huesos y piel, y que al igual que los demás fármacos, es excretado en la orina en concentraciones superiores al 80% de la cantidad total consumida. Debido al gran empleo de cefalexina en los tratamientos infecciosos y su incidencia como contaminante emergente, Numerosos grupos de investigación han estudiado la eliminación de antibióticos β -lactámicos mediante diversas técnicas, incluyendo técnicas tradicionales como la adsorción y el uso de semiconductores, así como técnicas más complejas como la degradación sonoquímica, la fotocatálisis e incluso la oxidación electrolítica (Das, N *et al.*, 2019). Sin embargo, pese a los esfuerzos en la investigación, estos métodos resultan altamente costosos y no se encuentra regulados en ningún país.

Por tanto, con la finalidad de atender esta preocupación. En este trabajo se ofrece una nueva alternativa sustentable para el medio ambiente y su entorno, y que a su vez sea accesible económicamente.

Justificación

La cefalexina es un contaminante emergente que actualmente ha causado gran preocupación debido a que aparece con mayor frecuencia en diversos cuerpos de agua, generando un impacto ambiental negativo sobre la flora y fauna en los ecosistemas; dentro de los efectos inmediatos debido a su alto consumo en la intervención médica y quirúrgica, ocasionando un consumo excesivo y, en la mayoría de los casos conllevando a la resistencia bacteriana. Además, tomando en cuenta que no existe ninguna normatividad que regule los contaminantes emergentes, así como ninguna metodología estandarizada establecida para su eliminación, degradación y extracción de los efluentes es por lo que se propone esta investigación como una nueva metodología para la extracción de contaminantes emergentes. Esta metodología consiste en tratamientos electroquímicos por medio de la técnica de voltamperometría cíclica y polarización con la ayuda de metales convencionales que funcionen como sustrato, en este caso particular se utiliza el aluminio debido a que es un material de bajo costo y buena conductividad eléctrica (Obot, I.B & Obi-Egbedi, N.O, 2010; Orr, G & Golan, G, 2021; Dreser, A, *et al*, 2008).

Planteamiento del problema

Actualmente, el tratamiento de infecciones se usa con antibióticos, cada tratamiento depende de los casos de infección y su nivel de afectación, dado que dichos medicamentos han evolucionado respecto a diferentes problemas de salud y necesidades en el tiempo. Se ha demostrado que el uso excesivo o continuo de los antibióticos ha presentado una resistencia bacteriana; convirtiéndolo en un problema actual, no solo por el hecho de combatir contra las nuevas cepas bacterianas resistentes, sino por el lugar donde terminan los desechos de los antibióticos (Palacio, D. A, 2020). Dado que los compuestos orgánicos, conocidos como contaminantes emergentes, tienen un impacto ambiental en el entorno acuático y/o terrestre, estos contaminantes presentan un riesgo para la salud de los entornos mencionados, ya que actualmente no se encuentran regulados los contaminantes emergentes; pero se contempla que en un futuro sean regulados por normas correspondientes (De la Cruz, N, 2012).

En este trabajo se pretende atender la problemática de un contaminante emergente del tipo antibiótico utilizando las técnicas electroquímicas, como alternativa para minimizar el impacto ambiental de éste en el medio ambiente. Debido a que la presencia de estos compuestos orgánicos en las aguas residuales y que presentan una problemática en la que se está presentando a nivel mundial (Reichert, G, *et al*, 2019).

Antecedentes

En los últimos años, ha surgido una preocupación por la presencia de contaminantes emergentes, como lo son los antibióticos presentes en cuerpos de agua; como resultado del uso excesivo de productos que representan un problema grave y un desafío importante en la gestión del agua y en la protección del medio ambiente (Palacio, D. A, 2020); por ello se han utilizado diversas técnicas avanzadas para tratar el agua para la reducción de la presencia de contaminantes emergentes orgánicos, en las cuales incluyen procesos de oxidación avanzados (Oturán, M. A & Aaron, J.J, 2014), en donde el uso de agentes oxidantes como lo es el ozono, peróxido de hidrógeno y la radiación ultravioleta para descomponer los residuos orgánicos; la filtración con carbón activado que involucra trasladar el agua a través de filtros de carbón activado, para adsorber y eliminar los residuos, mientras que la filtración por membranas con lleva a una separación física de los residuos del agua; en los tratamientos biológicos avanzados, como los humedales artificiales y biorreactores de membrana pueden degradar eficazmente los residuos mediante la acción de microorganismos, así como los procesos electroquímicos y de adsorción los cuales son una opción prometedora en los que ofrecen una eficiente degradación de una amplia gama de compuestos orgánicos, en el cual se basan en reacciones de oxido-reducción que tienen lugar en el electrodo, en donde se generan especies químicas altamente reactivas, como radicales hidroxilo, peróxido de hidrogeno y ozono que son capaces de degradar los contaminantes orgánicos en los sistemas acuosos, en que él tienen lugar las técnicas electroquímicas , como la electrocoagulación que implica la generación de coagulantes mediante la electrólisis de electrodos metálicos, así como la electro oxidación degrada mediante la aplicación de corriente eléctrica directa en un electrodo activo, con llevado a la formación de especies oxidantes que atacan y degradan los contaminantes orgánicos; así como la técnica de electro fenton que es una combinación entre la generación de peróxido de hidrogeno

mediante la reducción del oxígeno con la producción de radicales hidroxilo mediante la activación del hierro en solución ácida, dado que los radicales hidroxilo son altamente oxidantes pueden degradar eficazmente a los contaminantes; y finalmente tienen lugar las técnicas de electroadsorción, en el cual los contaminantes son adsorbidos en el electrodo activos antes de ser degradados electroquímicamente, mejorando la eficiencia de remoción de contaminantes emergentes, especialmente para aquellos que son difíciles de degradar directamente en el electrodo.

Los procesos electroquímicos ofrecen varias ventajas en su uso, principalmente como la alta eficiencia en el proceso de remoción de contaminantes, una operación a temperatura ambiente y la posibilidad de utilizar energía renovable para la generación de corrientes eléctrica. No obstante, también han presentado varios desafíos, como la generación de subproductos tóxicos o no tóxicos, y de la necesidad de optimizar las condiciones operativas para maximizar la eficiencia de remoción de dichos contaminantes (Jiménez, C, 2011; Gao, R, *et al*, 2022).

Objetivos

Objetivo general:

Recuperar cefalexina de un agua residual sintética empleando un electrodo de aluminio, aplicando un voltaje controlado

Objetivos específicos:

- Obtener el potencial óptimo de óxido-reducción del aluminio por medio de un barrido de potenciales con la técnica de voltamperometría cíclica a tres diferentes pHs (4, 7 y 9)
- Estudiar los estados de óxido-reducción del aluminio en presencia de cefalexina en las condiciones óptimas (pH, potencial y concentración del antibiótico) por medio de pruebas potencioestáticas
- Estudiar el mecanismo de remoción de la cefalexina

Hipótesis

Es posible remover cefalexina de aguas residuales con un electrodo de aluminio a determinado potencial y pH.

Alcances y limitaciones

Este trabajo se limita al estudio de una de las cefalosporinas de primera generación, la cefalexina, en pH 4,7 y 9, simulando un agua residual sintética en el laboratorio para aplicar un tratamiento electroquímico con un material metálico convencional, en este caso aluminio. El proyecto se realizó en condiciones a temperatura ambiente y en concentraciones de cefalexina semejantes a las cantidades en las que diversos contaminantes emergentes han sido identificados en los efluentes según lo reportado (Rivera-Jaimes J. A, *et al*, 2018, Reichert, G, *et al*, 2019, Deblonde T, *et al*, 2011).

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

1. Antibióticos

Los antibióticos marcaron un antes y un después para la ciencia y para la vida humana, extendiendo una oportunidad de mejora para todos aquellos quienes los consumen, mejorando sus dolencias, síntomas y molestias causadas por bacterias y hongos. Por lo que se han extendido de manera global, siendo uno de los medicamentos con mayor consumo para combatir este tipo de infecciones.

Estos son compuestos químicos que pueden inhibir o matar los microorganismos, principalmente usados para el tratamiento de infecciones causadas por bacterias. Desde el descubrimiento de la penicilina por Alexander Fleming, se han desarrollado diversos tipos de antibióticos, como tetraciclinas, cefalosporinas y quinolonas, que han ampliado la gama de tratamientos para combatir las infecciones bacterianas (Fleming, A, 1929). Algunos de los antibióticos, como es en el caso de la penicilina, interfieren con la síntesis de la pared celular bacteriana, mientras que en los otros afectan la síntesis de proteínas, como las tetraciclinas. Además, algunos antibióticos cambian la permeabilidad de las membranas celulares, lo que conduce a la lisis bacteriana, es decir, a un proceso en donde las bacterias son destruidas o desintegradas como parte de la acción de factores externos, el cual conduce a la ruptura de la membrana celular de las bacterias conduciendo finalmente a su muerte (Nikaido, H, 2003).

A lo largo de los años se ha podido descubrir que el uso inadecuado o excesivo de los antibióticos, como la automedicación y la prescripción innecesaria ha contribuido al problema de la resistencia bacteriana, dándose a entender que la resistencia antibiótica es un proceso evolutivo dentro de la familia de los microorganismos (Dreser, A, *et al*, 2008), con esto surge una preocupación creciente en la salud pública, ya que las bacterias pueden desarrollar resistencia a los antibióticos mediante

mutaciones genéticas o la transferencia de genes de resistencia entre las especies (Levy, S. B, 1998), señalando una amenaza a la efectividad de tratamientos médicos y aumentando la tasas de enfermedad y muerte en la población asociada a infecciones (O'Neill, J, 2016).

1.1.Cefalosporinas

Identificado en 1945 como *Cephalosporium acremonium*, por el microbiólogo Giuseppe Brotzu, antibiótico similar a la penicilina el cual se obtiene del ácido 7-aminocefalosporánico (7-ACA) dicho antibiótico dado al ser modificado ha presentado varias generaciones, las cuales han demostrado efectividad y resistencia contra las infecciones (Abraham, E.P, 1987).

Las cefalosporinas son grupos de antibióticos que pertenecen a la familia de los antibióticos beta-lactámicos, los cuales comparten una estructura química comúnmente conocido como el anillo beta-lactámico (Ver Figura 1); su particularidad de este anillo es la actividad antibacteriana que surge en estos compuestos al interferir con la síntesis de la pared celular bacteriana (Zaffiri, L, *et al*, 2012), son de los antibióticos más utilizados clínicamente ya que como anteriormente fue mencionado estos pertenece a una familia con mayor antimicrobianos, el cual contiene una lenta acción bactericida, y presentan una escasa toxicidad.

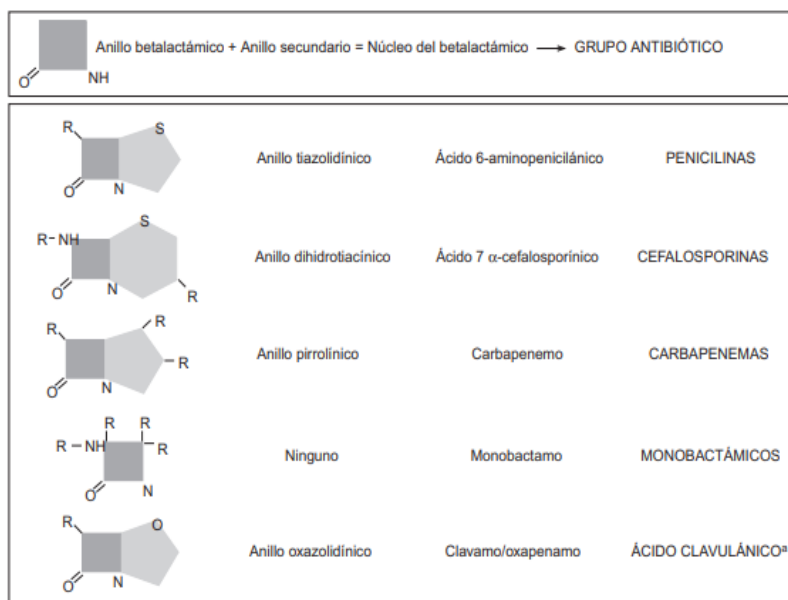


Figura 1. Estructura química de los antibióticos beta-lactámicos. (Tomado de: Suárez, C & Gudíol, F, 2009)

Tienen como característica que suele ser similar su estructura química a la de la penicilina, con ciertas modificaciones químicas. Como se puede observar en la Figura 1, la estructura de las cefalosporinas consiste en un anillo beta-lactámico unido a un anillo dihidrotiazínico, mientras que en comparación la penicilina está unido a un anillo tiazolidínico; en las cefalosporinas surgen diferentes generaciones que contienen diferentes indicaciones clínicas y para diversos tratamientos de infecciones (Ver Tabla 1). Estos antibióticos son bactericidas, lo que significa que actúan inhibiendo o eliminando las bacterias, su acción principal es la inhibición de la síntesis de la pared celular bacteriana, en donde la pared celular es la estructura que rodea a las bacterias y le otorga la forma y rigidez. Cuando se involucra el antibiótico con la síntesis de la pared celular, estos debilitan su estructura de las bacterias llevando a la lisis bacteriana (Suárez, C & Gudíol, F, 2009; Neu, H. C, 1992).

Tabla 1. Clasificación de las cefalosporinas (Tomado de: Rivas, K. B, *et al*, 2002)

Generación	Vía Parenteral	Vía Oral
Primera	Cefalotina Cefazolina Cefradina Cefapirina	Cefalexina Cefadroxilo Cefradina
Segunda	Cefamandol Cefonicid Cefoxitina Cefuroxime Cefotetan Cefmetazole Ceforanide Ceforinida	Loracarbef Cefaclor Cefuroxime axetil Cefprozil
Tercera	Ceftazidime Cefotaxime Ceftizoxime Cefoperazone Moxalactam Cefmenoxime	Ceftibuten Cefdinir Cefpodoxima proxetil
Cuarta	Cefepime Cefpirone Cefpiramide Cefozopran E 1100 FK 037	(La cuarta generación no existe presentación en vía oral)

Cada generación de las cefalosporinas es parte de diversos tratamientos, estos dependen de cierta forma del tipo de infección y de la gravedad de este, dado al tipo de bacteria que la causa. Las cefalosporinas de primera generación se suelen recetar para tratar infecciones de piel y urinarias, en el caso de las de segunda generación tratan infecciones respiratorias, urinarias, de piel e intraabdominales. Las cefalosporinas de tercera generación son utilizadas para tratar graves infecciones, cómo la neumonía y sepsis, mientras que finalmente las cefalosporinas de la cuarta generación son prescritas para infecciones resistentes a las de la anterior generación (Rivas, K. B, *et al*, 2002), utilizadas únicamente de vía parental, es decir, su vía de transporte es mediante inyecciones, útil para tratar neumonía, sepsis multimicrobiana, meningitis y otras enfermedades severas (Maguiña, C, *et al*, 2006). Expuesto lo anterior se logra apreciar la gran gama de aplicaciones clínicas y la gran aportación de este antibiótico, desde infecciones respiratorias, urinarias, de piel, tejidos blandos, entre otras (Conejo, A. J, & Moraga, F.A, 2016).

Finalmente, así como otros antibióticos, las cefalosporinas también han presentado resistencia bacteriana, esto sucede cuando los microorganismos, como bacterias o hongos, extienden la capacidad de combatir a los antibióticos creados para eliminarlos; cuando en los antibióticos disminuyen su eficacia estos pierden de la capacidad de tratar infecciones (Centers for Disease Control and Prevention, 2023) , lo que puede ocurrir mediante las mutaciones de las proteínas de unión a las penicilinas o debido a la producción de enzimas beta-lactamas que inactivan los antibióticos (Woodford, N, *et al*, 2011).

1.1.1. Cefalexina

La cefalexina es un miembro importante de la familia de las cefalosporinas, su importancia clínica ha sido creciente a lo largo del tiempo por su exitosa contribución a la medicina para el tratamiento

de varias infecciones en la humanidad. Fue desarrollada en los años 60's, se trata de una cefalosporina de la primera generación usada para tratar infecciones principalmente de piel, urinarias y respiratorias. Su acción es mediante la inhibición de la síntesis de la pared celular bacteriana y por consiguiente la lisis bacteriana. Emplea un extenso espectro, llegándose a considerar como un seguro y efectivo antibiótico para el uso en adultos y niños, está es administrada exclusivamente por vía oral, en las cuáles existen diferentes presentaciones, las cuales pueden ser: cápsulas, tabletas y suspensión oral (Speight, T. M, *et al*, 1972).

La Figura 2 muestra la estructura de la cefalexina, donde se puede apreciar que este antibiótico contiene un anillo aromático (extremo derecho), 3 aminas de las cuales una es una amina primaria que se encuentra como sustituyente en la cadena, otra secundaria que forma parte de la cadena y por último una amina terciaria como heteroátomo del anillo dihidrotiazínico que a su vez se encuentra unido a un anillo adicional formado por átomos de carbono y un átomo de azufre (extremo izquierdo). Además, la molécula cuenta con 3 grupos carbonilo, donde uno de estos forma parte de la cadena, en segundo es parte del anillo dihidrotiazínico y el tercero es un ácido carboxílico unido como grupo funcional al anillo que contiene azufre y finalmente la presencia de un metilo (Basáez, L., & Vanýsek, P. 1999).

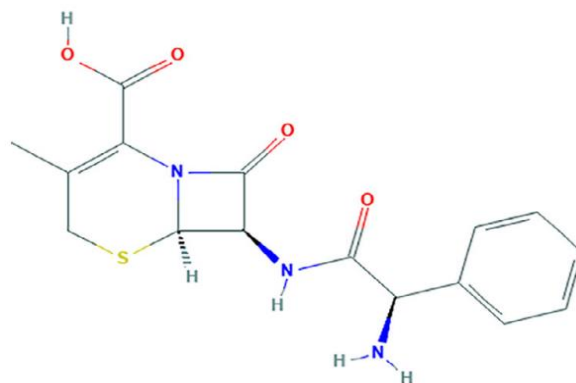


Figura 2. Estructura química de la cefalexina. (Obtenido de: Chaudhary, T, *et al*, 2021)

Nota: Átomo azul representa nitrógeno (N), Átomo rojo representa oxígeno (O), Átomo amarillo representa azufre (S), Átomo gris representa carbono (C), Átomo blanco representa hidrógeno (H)

Dentro de la farmacocinética de la cefalexina, destaca que esta se absorbe positivamente dentro del tracto gastrointestinal una vez que se haya administrado vía oral, esta se distribuye en los tejidos y fluidos del cuerpo para ser ejecutada ante la infección, finalmente es extraída en gran medida mediante la excreción renal en su forma activa y sin cambios en el compuesto (Palacio Badel, D. A. 2020). La presencia de este tipo de contaminante en los sistemas acuáticos son el resultado de diversas vías de entrada, principalmente a través de las actividades humanas y animales, como lo son: las descargas de efluentes residuales que provienen de instalaciones médicas, farmacéuticas y domésticas que contienen la presencia de antibióticos y metabolitos, así creando una fuente importante de contaminación en cuerpos de agua (Kümmerer, K, 2009). En la agricultura y ganadería el uso de antibióticos puede llegar a causar la disolución de estos compuestos a través del suelo, y finalmente llegando a los cuerpos de agua más cercanos, un animal tratado con antibióticos mediante su defecación implica la contaminación de suelos como anteriormente se mencionó (Sarmah, A. K, *et al*, 2006), no obstante una fuente de entrada de antibióticos en cuerpos de agua puede ser transportados a través del aire y depositarse mediante la lluvia en los sistemas acuáticos (Liu, S, *et al*, 2017).

2. Aluminio

El aluminio es un elemento químico conocido por su símbolo “Al” con número atómico 13 en la tabla periódica de elementos, es un metal ligero con una densidad de 2.7 g/cm^3 ; en 1825 Hans Christian Oersted identificó un material muy similar a lo que hoy conocemos como aluminio, pero fue en 1827 cuando finalmente se obtuvieron pequeñas cantidades de aluminio, mediante la reducción de cloruro de aluminio con potasio (Garza, M, 1999).

En 1889 finalmente fue permitida la producción masiva y económica del aluminio, mediante la electrólisis, esto dado a un proyecto desarrollado por Charles Martin Hall y Paul Héroult, en el cual se consiguió la producción menos costosa del aluminio a gran escala, llevando a lo que hoy conocemos el aluminio como un material convencional con facilidad de obtener a menor costo a diferencia de los otros materiales (Craig, N. C, 2013).

Tiene una estructura cristalina cúbica centrada en sus caras (Ver Figura 3), la cual le otorga propiedades mecánicas favorables, como lo son la dureza y su resistencia; las cuales hacen al metal fácil de modificar su forma, por lo que dicho metal contiene numerosas aplicaciones en materiales inflamable son explosivos (González, A, 2021).

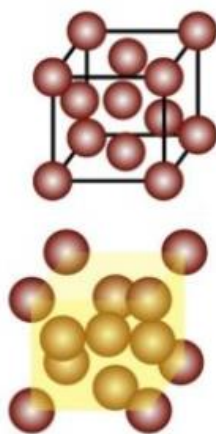


Figura 3. Estructura cristalina centrada en las caras. (Obtenido por: González, A, 2021)

El aluminio se ha encontrado que es útil para diversas aplicaciones industriales, desde la fabricación de vehículos hasta envases y en la construcción, debido a que es un material con gran resistencia y ligereza (Davis, J. R, 1999). Actualmente este material ha sido foco de atención en temas de reciclaje para su sustentabilidad, llevado a cabo acciones de practicar de reciclaje para tratar su contaminación en el medio ambiente afectando a los sistemas que son parte de la corteza terrestre (Nuss, P & Eckelman, M. J, 2014).

Aunque el aluminio es resistente a la corrosión, debido a la formación de una capa de óxido, hay ciertos factores, como los entornos altamente ácidos o salinos, que pueden provocar la corrosión en este material. Hoy en día existen estrategias como la anodización, recubrimientos protectores y aleaciones específicas, que se utilizan para mitigar este problema (Liaw, P. K & David, S. A, 2017).

3. Corrosión

La corrosión es el proceso natural que afecta principalmente a los materiales metálicos, así como también a materiales que están expuestos a los entornos corrosivos; esto conlleva a una degradación gradual del material debido a las reacciones químicas que existen en su entorno. Existen diversos tipos de corrosión, como lo son: La corrosión atmosférica, por picaduras, galvánica, por erosión, microbiológica, entre otros (Gómez de Saravia, S. G, 1991).

Algunos de los factores que afectan a los materiales metálicos y en consecuencia a la corrosión de dichos metales, son: la humedad, temperatura, el pH, la concentración de gases corrosivos o la presencia de contaminantes en el entorno de los materiales metálicos.

La corrosión de los metales puede ser estudiada mediante la electroquímica, por lo que se han diseñado diversas técnicas donde es posible conocer información sobre la termodinámica y la cinética de los procesos de óxido-reducción propias de los metales.

3.1. Termodinámica de la corrosión

La termodinámica de la corrosión es el estudio de los aspectos termodinámicos de los procesos corrosivos, que son reacciones electroquímicas que involucran la degradación de materiales debido a la acción del medio ambiente. Esta se centra en entender las fuerzas impulsoras y restricciones

termodinámicas de estos procesos (Fontana, M. G & Greene, N. D, 1967). Utiliza el concepto de potencial de electrodo para predecir condiciones bajo las cuales los metales son susceptibles a la corrosión, esto se explora mediante la determinación y construcción de diagramas Pourbaix, los cuales representan las regiones de estabilidad de diferentes especies químicas en función del potencial y del pH (Pourbaix, M, 1974).

La espontaneidad de la corrosión hace referencia al cambio en la energía libre de Gibbs (ΔG), la cual se utiliza para determinar la espontaneidad de los procesos corrosivos, un ΔG negativo indica que la corrosión es termodinámicamente favorable (Bard, A. J & Faulkner, L. R, 2001). La termodinámica de la corrosión ayuda a identificar las condiciones en las cuales la corrosión es más probable, como en presencia de agresivos químicos o en entornos con potenciales electroquímicos, en los que la velocidad de corrosión anódica es igual a la velocidad de corrosión catódica, en donde el potencial de equilibrio se refiere al potencial donde ambas reacciones son iguales (Jones, D.A, 1996).

Algunas de las aplicaciones en la prevención de la corrosión, implica comprender la termodinámica de la corrosión para la selección de materiales resistentes y diseñar sistemas que minimicen la susceptibilidad a la corrosión, de dicho modo es considerablemente relevante el uso y desarrollo de inhibidores de corrosión (Revie, R. W & Uhlig, H. H, 2008) buscando la disminución de la velocidad de la corrosión en metales mediante la modificación de reacciones electroquímicas (Roberge, P. R, 2008).

3.1.1. Diagramas de Pourbaix

Los diagramas de Pourbaix conocidos como diagramas de potencial-pH o diagramas de equilibrio electroquímico, funcionan como una herramienta muy útil en la termodinámica del proceso de

óxido-reducción de metales, donde éstos representan las regiones de estabilidad de diferentes conjuntos químicos en función del potencial electroquímico y del pH de la solución a trabajar.

Cada elemento o especie química posee su propia curva en el diagrama de Pourbaix y las intersecciones de estas curvas indican las condiciones bajo las cuales una especie es termodinámicamente estable (Pourbaix, M, 1974).

El diagrama se divide en regiones, como son: la región de corrosión, de pasivación y de inmunidad a la corrosión. Estas regiones representan diferentes estados de estabilidad electroquímica (Fontana, M. G & Greene, N. D, 1967). La siguiente Figura (Figura 4) muestra en condiciones de 25 °C y 1 atm, el diagrama de Pourbaix para el sistema aluminio-agua donde se puede apreciar que en el eje de las 'x' se posicionan las diferentes condiciones de pH que pueden tener el medio.; y en el eje de la variable dependiente 'y, se observa el potencial. Lo cual permite observar la variación de potencial necesario para que se formen y estabilicen las especies. Por tanto, en este caso particular del aluminio se observa que la escala de pH de 2 a 5, se encuentra la estabilidad del óxido de aluminio (Samaniego, P. O, 2019).

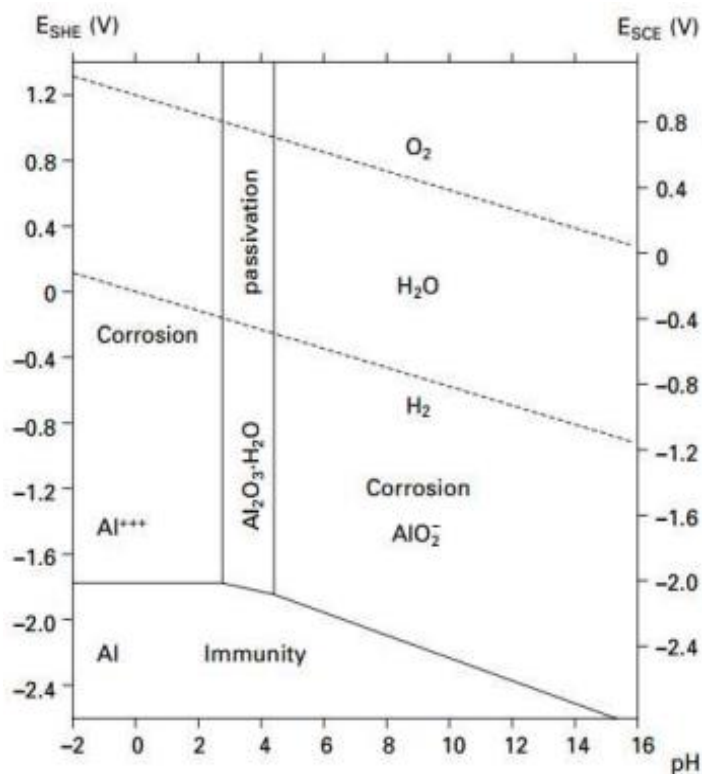


Figura 4. Diagrama de Pourbaix para el aluminio (Obtenido de: Samaniego, P. O, 2019)

Las intersecciones de las líneas en el diagrama indican las condiciones en las que coexisten múltiples especies; cada línea en el diagrama representa la variación de los elementos químicos con el cambio en el potencial y el pH; la dirección de la curva indica si la especie está en su forma oxidada o reducida. (Jones, D.A, 1992). Por ende, las líneas horizontales representan las reacciones con dependencia del potencial. En el caso de las líneas verticales, se puede obtener información sobre la dependencia del pH, y las líneas diagonales muestran dependencia tanto con el pH como con el potencial.

Además, el diagrama de Pourbaix del ejemplo muestra diferentes tipos de líneas, en el caso de las de trazado continuo indican equilibrio ya sea entre especies sólidas o una especie soluble, mientras que las líneas de trazado discontinuo indican un equilibrio entre dos especies solubles. (Muñoz, M. J, 2011). Estos diagramas predicen las condiciones bajo las cuales un metal será corroído o se

mantendrá pasivado, se usan para seleccionar materiales y diseñar sistemas resistentes a la corrosión. Teniendo en cuenta que estos tipos de diagramas son capaces de proporcionar información teórica basada en las condiciones de equilibrio y sin tomar en consideración factores cinéticos y otros aspectos de la corrosión, en conjunto con la técnica de voltamperometría cíclica los diagramas de Pourbaix.

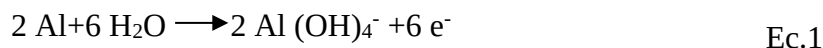
Son cruciales para evaluar la estabilidad termodinámica de las especies químicas en soluciones acuosas y predicen el comportamiento de los metales en diversos entornos corrosivos.

3.2. Cinética de la óxido-reducción

La cinética de las reacciones de oxidación y reducción en un metal empleado en una técnica electroquímica indica la rapidez con la que se produce una reacción entre los electrodos, lo que también se conoce como la reacción de corrosión. Es uno de los parámetros más importantes en el estudio de la electroquímica, ya que la velocidad de reacción implica la determinación de la cantidad de reactivos que permanecen en el producto después de un cierto tiempo del tratamiento Electroquímico. En este contexto, es importante examinar la naturaleza de las reacciones irreversibles que se producen en la superficie de los materiales metálicos durante las reacciones de óxido-reducción (Fontana, M. G & Green, N. D, 1967).

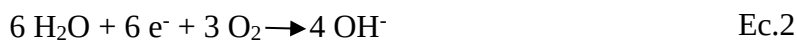
Es decir, este proceso toma el lugar de estudiar la velocidad de las reacciones electroquímicas y químicas que suceden en los procesos corrosivos, y factores que afectan estas velocidades, factor crítico que influye son los efectos de la temperatura, ya que si está aumenta acelera las reacciones corrosivas (Revie, R. W & Uhlig, H. H, 2008). La cinética de la corrosión electroquímica implica principalmente el estudio de la velocidad en las reacciones anódicas y catódicas.

Las reacciones anódicas, en el caso del aluminio, suceden dentro del proceso de corrosión y pueden ir variando, dependiendo del entorno específico de este como la composición del electrolito y sus condiciones de pH. Sin embargo, considerando un entorno común, como en presencia de agua con oxígeno, la reacción anódica se puede describir como lo demuestra la Ecuación 1:



La reacción representa la oxidación del aluminio en iones de aluminio hidratados (Al (OH)_4^-) con la liberación de electrones, que es la parte anódica del proceso corrosivo. Además, en soluciones más ácidas, se pueden formar iones de aluminio con cargas más altas como Al_3^+ , mientras que, en soluciones más alcalinas, pueden estar involucrados iones hidroxilo OH^- en su reacción anódica.

La reacción catódica del aluminio se puede describir de la siguiente manera:



En donde esta reacción implica la reducción del oxígeno disuelto (O_2) y la formación de iones hidróxido (OH^-) en la parte catódica del proceso corrosivo del aluminio. Así mismo, igual que en la reacción anódica implica las condiciones específicas como el pH del entorno y la presencia de los iones; en los entornos ácidos, la reacción catódica puede incluir la reducción de protones (H^+) en lugar del oxígeno (Bard, A. J & Faulkner, L. R, 2001).

En conclusión, la termodinámica de la corrosión concede predecir la vulnerabilidad de los metales en diferentes condiciones, mientras que la cinética de la reacción puede calcularse experimentalmente para obtener cuantitativamente la corrosión de la superficie metálica (Sørensen, *et al*, 2009).

4. Técnicas electroquímicas

Las técnicas electroquímicas constituyen un conjunto de métodos analíticos y experimentales que se centran en el estudio de las interacciones entre la electricidad y los procesos químicos; son utilizadas para las investigaciones y caracterización de reacciones redox, e igualmente para analizar la cinética y termodinámica de diversas transformaciones electroquímicas. Cuentan con una amplia gama de aplicaciones por mencionar algunas, como lo es la química analítica, electroquímica industrial, la nanotecnología, y en otras áreas de aplicación (Compton, R. G & Banks, C. E, 2018).

Entre los aspectos fundamentales de las técnicas electroquímicas, está la medición de corrientes y potenciales en donde se tiene a lugar una o más reacciones redox. Existen diversos métodos los cuales son: la voltamperometría, cronopotenciometría, la impedancia electroquímica y la espectroscopía de impedancia electroquímica. Todas estas técnicas proporcionan información detallada sobre la velocidad de reacción, eficiencia de los procesos electroquímicos y propiedades de materiales electroactivos (Bard, A. J & Faulkner, L. R, 2001, Kissinger, P. T & Heineman, W. R, 1983).

Un ejemplo de alguna de las técnicas, como lo son la voltamperometría, la cual su aplicación es controlada de un potencial eléctrico a través de una celda electroquímica, en tanto que se mide la corriente resultante; este método permite determinar propiedades termodinámicas y cinéticas de las reacciones redox, así también como identificar especies químicas presentes en la muestra (Scholz, F, 2010). Un último ejemplo de estas técnicas es la impedancia electroquímica, en donde esta se basa en el análisis del resultado de un sistema a una señal alterna aplicada, en el cual

proporciona información sobre la resistencia y capacitancia de la interfaz electrodo-electrolito (Macdonald, J. R, 1992).

Estos tipos de estudios electroquímicos han atribuido notablemente al desarrollo de tecnologías emergentes, permitiendo nuevas posibilidades en la detección y monitoreo de sustancias a nivel molecular (Scholz, F, 2015).

4.1. Voltamperometría cíclica

Es una de las técnicas más utilizadas, dada su versatilidad en estudios para investigaciones en diferentes áreas, como lo son en química inorgánica, orgánica, bioquímica, entre otras áreas; en donde finalmente aplicando esta técnica se obtiene información cualitativa de los procesos que involucran la transferencia de electrones, o bien para saber sobre el comportamiento reversible o irreversible para determinar si hubo una transferencia de electrones en una oxidación o reducción, así como su mecanismo de reacción. la voltamperometría cíclica consiste en aplicar un potencial eléctrico al electrodo de trabajo, en una forma de onda cíclica, es decir, un barrido de potenciales, de los cuales se obtiene la medición de la corriente que se genera en el electrodo de trabajo en función del tiempo. En la Figura 5 es posible observar un voltamograma, es decir, una gráfica de una prueba de voltamperometría cíclica donde el eje de las 'x' representa la variable independiente o el parámetro dado al sistema, en este caso, el potencial (E); en el eje de las 'y' se representan los datos obtenidos de la corriente generada (i) como consecuencia de la aplicación del potencial o voltaje. Asimismo, se define con una flecha la dirección de barrido al aplicar el potencial. Con lo que se genera un ciclo donde la curva superior representa el comportamiento de la superficie ante las reacciones de oxidación y la parte inferior corresponde a las reacciones de reducción que generalmente toman forma de "cabeza de pato".

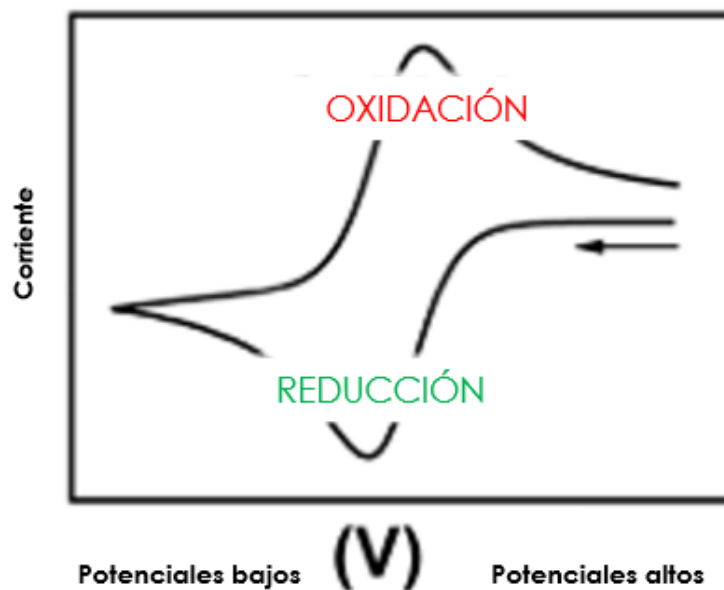


Figura 5. Voltamograma correspondiente a una prueba de voltamperometría cíclica (Obtenido de: Elgrishi N, Rountree, K, *et al*, 2018)

Otro factor importante en una prueba de voltamperometría cíclica es la velocidad de barrido en mV/s. En la Figura 6 se observa como la misma superficie y el mismo medio pueden generar un voltamperograma distinto si no se emplea la velocidad de barrido correspondiente en el experimento ya que dependiendo de los procesos de adsorción, desorción y los compuestos intermediarios, pueden depender del tiempo. Por ejemplo, la adsorción física es un proceso lento que se observa cuando se realizan voltamperometrías a bajas velocidades, por otro lado, la quimisorción es un proceso rápido que puede ser identificado con voltamperometrías a velocidades más altas (Bockris J.O & Reddy A, 2000).

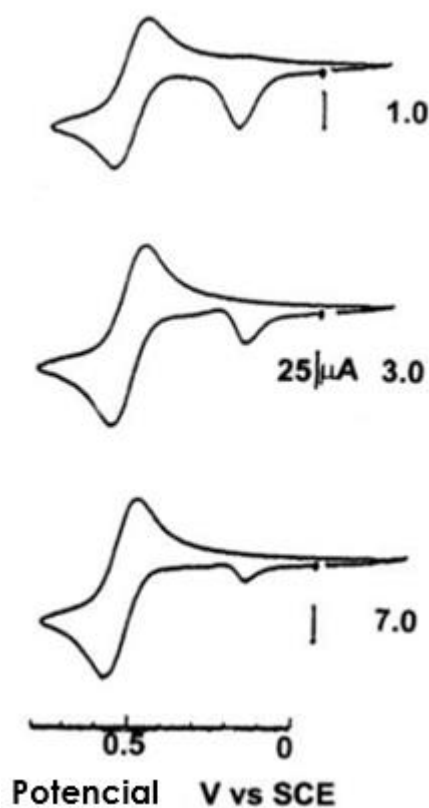


Figura 6. Voltamogramas a diferentes velocidades de barrido, donde se observa que los picos de reducción presentan diferencia en el tamaño, dependiendo de la velocidad (obtenido de Bockris J.O., Reddy A, 2000)

Esta técnica se lleva a cabo mediante un equipo en el cual se compone de diferentes factores como lo son:

- **Celda de trabajo:** Comúnmente se utilizan tres electrodos, como lo es el electrodo de trabajo, de referencia y un electrodo auxiliar.
- **Electrodos:** El electrodo de trabajo es que se tiene interés de trabajo, del metal deseado a trabajar, mientras que el electrodo de referencia es el que se conoce el potencial, comúnmente son empleados los de calomel saturado (SCE) o de Ag/AgCl; y finalmente el electrodo auxiliar que generalmente es de platino o de algún material inerte.

- **Potenciostato:** Los 3 electrodos, anteriormente son conectados en el potenciostato, el cuál es un instrumento que ayuda a controlar el potencial del electrodo de trabajo y como resultado la medición de su corriente.
- **Electrólito:** Es la solución que se añade para impedir que exista corrientes de migración, dado al movimiento que se genera en las partículas en el campo eléctrico, asegurando que siempre exista conductividad en la prueba (Flores, E, 1995).

La Figura 7 muestra la representación esquemática del montaje de una celda para realizar una voltamperometría cíclica,

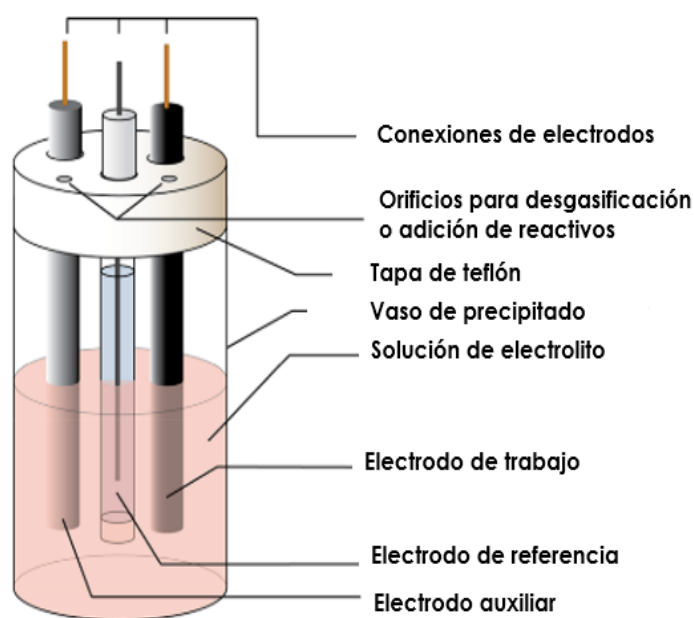


Figura 7. Representación de la construcción de una celda electrolítica para llevar a cabo una prueba de voltamperometría.

(modificado de Elgrishi N, Rountree K *et al.* 2018)

Una vez que la celda es montada, se conectan los electrodos al potenciostato donde se establecen los parámetros experimentales, como el tipo de materia, velocidad de barrido, el voltaje máximo y mínimo, así como el número de ciclos a los que se planea realizar el experimento. Finalmente, las mediciones se detectan con un software incluido en el equipo.

4.2. Ruido electroquímico

El estudio del proceso electroquímico de óxido-reducción de los materiales metálicos, también ha sido estudiado por la técnica electroquímica más reciente, el ruido electroquímico. Esta técnica puede recolectar datos sobre la evolución del sistema tomando en cuenta la termodinámica (el potencial), como la cinética (la corriente). El ruido electroquímico puede estudiarse a través del tiempo con variables diferentes:

- A) Ruido a potencial libre: cuando se toman lecturas tanto de la corriente como del potencial que el sistema genera espontáneamente.
- B) Ruido en dominio de la corriente: cuando se fija como variable independiente un valor de corriente y se toman las perturbaciones del potencial en estas condiciones.
- C) Ruido en dominio del potencial: cuando se fija un valor del potencial como variable independiente y se observa la evolución del sistema observando las variaciones de la corriente.
- D) Ruido en dominio del tiempo, en este caso puede estudiarse.

Por tanto, la técnica de ruido ofrece información valiosa para el estudio de la dinámica de superficies y recubrimientos de materiales metálicos, sometidos a diferentes condiciones, por ejemplo, es posible conocer las especies intermediarias, propiedades anticorrosivas de las superficies generadas, así como determinadas propiedades protectoras de los recubrimientos fabricados (González, M. & Uruchurtu, J, 2003).

Cabe mencionar que uno de los primeros materiales estudiados por medio del ruido electroquímico fue el aluminio en soluciones alcalinas. J. Uruchurtu y L. Dawson en 1987, demostraron en su estudio que gracias a la técnica del ruido electroquímico es posible detectar zonas de picadura en

el aluminio, así como las zonas de activación del metal pH neutros y alcalinos. Además, mencionaron que, con la técnica de ruido en condiciones de polarización, es posible activar el aluminio sometiéndolo al potencial de corrosión en un medio alcalino, donde se generan condiciones de pasivación, es decir, la generación de óxidos de aluminio que recubren la superficie (J. Uruchurtu & L. Dawson, 1987).

5. Espectrofotometría UV-Visible

La espectrofotometría es una técnica analítica que se basa en la capacidad de las moléculas de absorber radiación electromagnética en el rango UV-visible. La cantidad de luz absorbida por un compuesto en solución está relacionada directamente con su concentración, según la ley de Lambert Beer (García, E. M, 2012). Esta relación permite determinar la concentración de un compuesto midiendo la absorbancia de la luz a una longitud de onda específica utilizando un espectrofotómetro (Ver Figura 8).

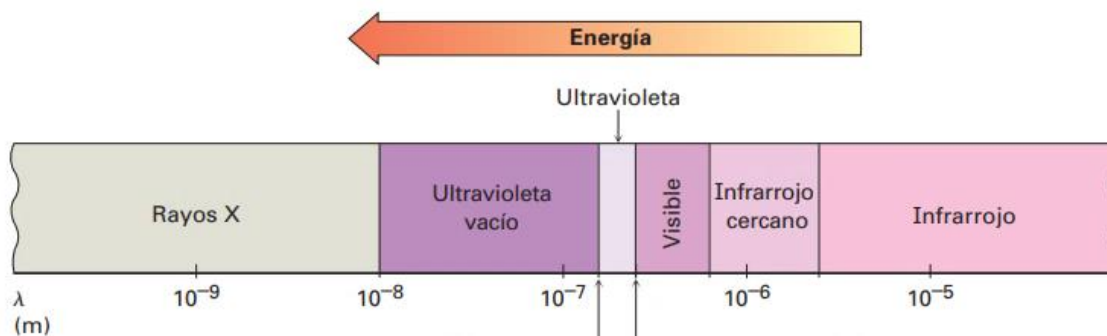


Figura 8. Regiones del espectro electromagnético (Obtenida de: Murry, J, *et al*, 2008)

La región espectral que corresponde a la espectrofotometría UV-Visible va de una longitud de onda entre 200 y 800 nm. Esta región es caracterizada por ser absorbida por electrones de valencia de moléculas y átomos, los cuales resultan ser excitados a grandes niveles de energía.

Según la ley de Lambert-Beer es necesario seleccionar la longitud de onda, por ello es por lo que previamente en el espectro de absorción de la sustancia a trabajar, la que consiste en una representación de valores de absorbancia contra la longitud de onda representada en nanómetros (nm), con los resultados del espectro de absorción se puede seleccionar el valor de longitud de onda en donde se tiene la absorbancia máxima (Ver Figura 9).

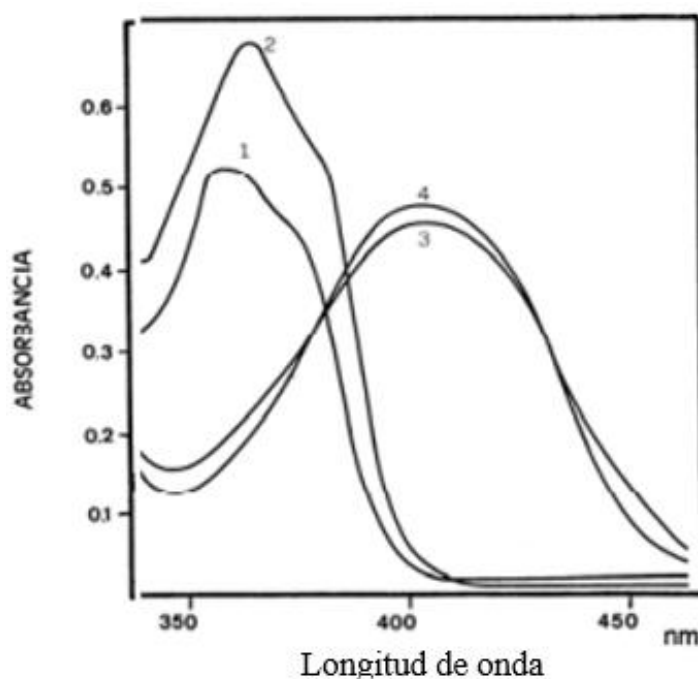


Figura 9. Espectro de longitud de onda (Obtenido de: Díaz, N, *et al*, 2010)

Los espectrofotómetros son instrumentos que constan de una fuente de luz, un monocromador, una celda de muestra y un detector para medir la absorbancia de la luz por las moléculas en solución. Los valores de absorbancia obtenidos a diferentes longitudes de onda se pueden utilizar para construir una curva de calibración que relaciona la absorbancia con la concentración del compuesto en solución (Díaz, N, *et al*, 2010).

Las transiciones electrónicas que ocurren en la región visible y ultravioleta son el resultado de la absorción de radiación por diferentes grupos ópticos, enlaces y grupos funcionales dentro de la

molécula. La longitud de onda y la intensidad de absorción dependen de estos grupos. La longitud de onda de absorción es la energía necesaria para la transición, mientras que la intensidad está relacionada con la probabilidad de que ocurra la transición debido a las interacciones en el sistema electrónico, la radiación y la polaridad del estado excitado.

Los grupos absorbentes de una molécula reciben el nombre de cromóforos, y cuando dicha molécula contiene el grupo cromóforo se le conoce como cromógeno. Los grupos o los radicales positivos de átomos en la molécula, son conocidos como auxocromo, estos no absorben radiación por sí solos, pero cuando éste se presenta en una molécula favorece la absorción de un cromóforo, o desplaza la longitud de onda de absorción cuando está unido al cromóforo; tal como sucede en los grupos hidroxilo, amino y halógenos (Christian, G. D, 2009).

Sus cambios espectrales se clasifican en cuatro tipos:

1. Desplazamiento batocrómico-máximo,
2. Desplazamiento hipsocrómico-máximo
3. Hiper Cromismo-aumento
4. Hipocromismo-disminución

El desplazamiento batocrómico-máximo es el cambio máximo en la longitud de onda de absorción mayores, es decir, menor energía, mientras que el desplazamiento hipsocrómico-máximo se refiere al cambio hacia longitudes de onda menores, en donde hay mayor energía; este fenómeno sucede debido a cambios en la solución, en su entorno, como el pH, temperatura, concentración o interacciones moleculares con otros compuestos. El hiper cromismo-aumento, se refiere en el aumento en la intensidad de absorción de luz, mientras que finalmente el hipocromismo - disminución, se refiere a la disminución en la intensidad de absorción; esto por debido a la

comparación de la sustancia con su forma original, esto debido a varios factores, como los cambios en su estructura molecular, solvatación, efectos de agregación, entre otros, lo que indica cambios en las propiedades de absorción de luz en la molécula (Skoog, D. A, *et al*, 2017).

Los espectros producidos por un cromóforo no afectan notablemente en cambios estructurales menores en otros sitios de la molécula (Christian, G. D, 2009).

CAPÍTULO III: DESARROLLO

La Figura 10 muestra el diagrama de flujo general de este estudio, para desarrollar los objetivos planteados; mediante las técnicas electroquímicas propuestas en tres concentraciones de cefalexina (5, 10 y 20 ppm). En el caso de las pruebas de voltamperometría cíclica se planteó realizar un barrido del potencial para encontrar la energía necesaria a la que reacciona la cefalexina con el aluminio. Una vez que se encontraron los parámetros adecuados, se realizaron las pruebas para la recuperación de cefalexina contenida en el agua residual sintética. Para la recuperación de la cefalexina, se empleó otra técnica electroquímica, para saber las curvas potenciostáticas, en la cual se fijó el potencial determinado en los anteriores ensayos de voltamperometría cíclica. Posteriormente se analizaron los procesos de oxido-reducción sobre el electrodo de aluminio en presencia y en ausencia del compuesto orgánico. Del análisis superficial y del agua residual tratada, se observó que existe una interacción entre el compuesto orgánico-metal o con sus óxidos en el rango del barrido del potencial y su velocidad correspondiente.

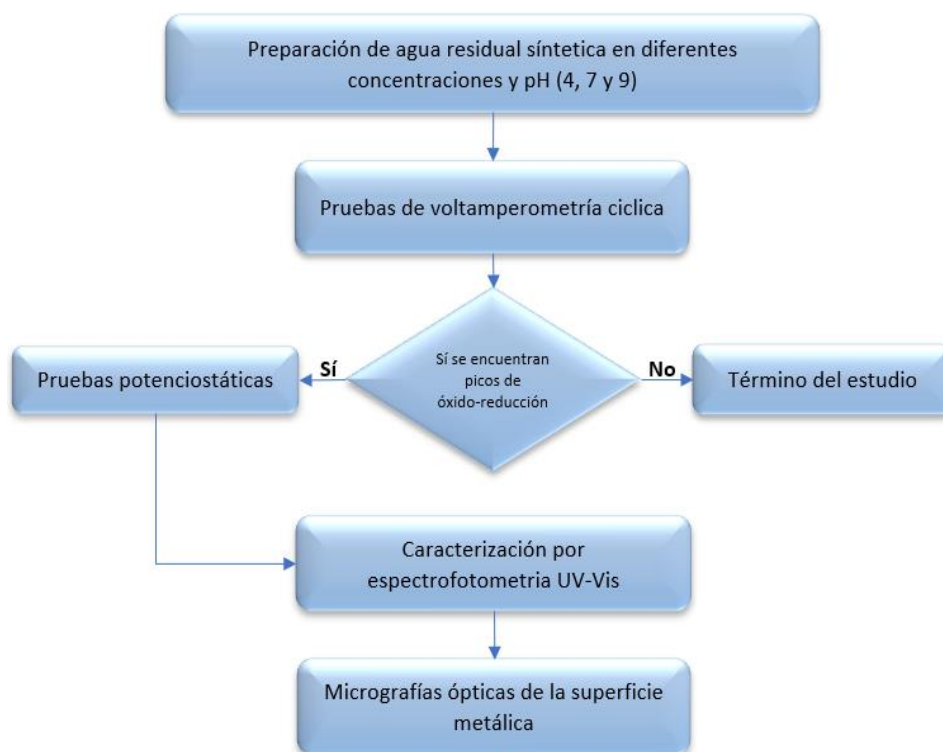


Figura 10. Representación gráfica de la metodología para el desarrollo del proyecto

Electrodo de trabajo

El electrodo de trabajo se construyó utilizando probetas cilíndricas de aluminio de 3 cm de longitud, las cuales se ranuraron en uno de sus extremos para colocar un cable de cobre de 10 cm. Finalmente, las probetas fueron encapsuladas con resina epóxica comercial dejando expuesta la superficie de la base de la probeta, denominada superficie de trabajo (0.28 cm²). Posteriormente, la superficie de trabajo fue pulida con papel lija grado 120, 240 y 600, se lavó con agua destilada y posteriormente se secó con una toalla de papel. Una vez preparada la superficie del electrodo, se montó una celda convencional de tres electrodos.

Preparación del electrolito

Se trabajó con diferentes valores de pH (4,7 y 9), se empleó NaOH para la obtención del pH 9 y H₂SO₄ para el pH 4. El volumen de la celda fue de 50 mL totales. Las pruebas en presencia de cefalexina se llevaron a cabo en diferentes concentraciones (5,10 y 20 ppm). Todas las pruebas se elaboraron por triplicado.

Pruebas de voltamperometría cíclica

Las pruebas de voltamperometría cíclica fueron realizadas con la ayuda de un potenciostato/galvanostato marca ACM instruments AutoZRA, con software V2-AZRA con 2 ciclos cada una de las pruebas, y un rango de potencial de -1400 a +500 mV para pH 4, de -1200 a +500 mV para pH 7 (Figura 11) y de -500 a +500 mV para pH 9 (Figura 11). Un electrodo de referencia saturado de Ag/AgCl, un electrodo auxiliar de grafito y como electrodo de trabajo, se empleó la probeta encapsulada de aluminio. Antes de cada ensayo se dejó alcanzar el estado estable a potencial libre durante 10 segundos. Todas las pruebas fueron repetidas por triplicado.



Figura 11. Prueba de voltamperometría cíclica en potenciostato a temperatura ambiente

Pruebas potencioestáticas (potencial constante)

Las pruebas potencioestáticas se llevaron a cabo aplicando un potencial fijo de -310 mV con un electrodo de referencia saturado de Ag/AgCl , un electrodo auxiliar de grafito y un electrodo de aluminio en un medio básico con $\text{pH } 9$, durante dos horas. Las pruebas se ejecutaron mediante un potenciostato elaborado por los alumnos de la carrera de Ingeniería en Sistemas Computacionales dependientes del Tecnológico de Estudios Superiores de Coacalco.

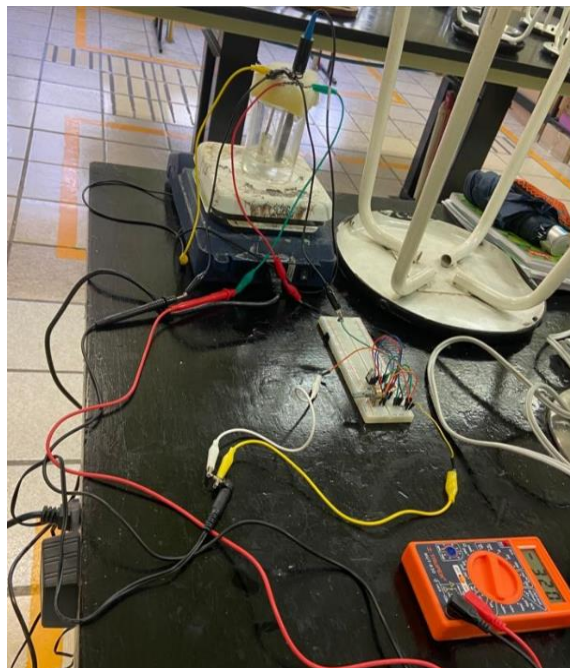


Figura 12. Prueba potencioestática a temperatura ambiente

Espectrofotometría UV-Visible

Las pruebas de espectrofotometría de ultravioleta visible (UV-Vis), se obtuvieron con un espectrofotómetro marca HACH modelo DR-6000. Después de realizadas las pruebas electroquímicas se analiza el electrolito trabajado a un rango de longitud de onda de 200 a 500 nm.



Figura 13. Prueba UV-Vis en proceso en espectrofotómetro

Microscopía óptica

Además, para conocer el análisis visual de las probetas de aluminio tras utilizarse en las pruebas potencioestáticas, se obtuvieron micrografías ópticas de las superficies de los electrodos de aluminio. Las imágenes se obtuvieron con un microscopio metalúrgico invertido de la marca CIENEC, modelo MJ6409 a 40 aumentos, ubicado en laboratorio de materiales dependiente del Tecnológico de Estudios Superiores de Coacalco.



Figura 14. Prueba de microscopía electrónica del aluminio después de su tratamiento electroquímico

CAPÍTULO IV: RESULTADO

1. Estudios de la superficie metálica

1.1.Pruebas electroquímicas

1.1.1. Voltamperometría cíclica

El estudio de las reacciones y energías de activación del aluminio se realizó por medio de las curvas de voltamperometría cíclica, con las cuales se realizaron barridos en los rangos de potencial tomados como referencia de los diagramas de Pourbaix. Considerando las zonas de activación (oxidación y pasivación) del aluminio. Y tomando como variables la ausencia y presencia de la cefalexina, el contaminante emergente, así como las variaciones de pH desde ácido, neutro a básico; por lo que se muestran a continuación los resultados sobre el barrido del potencial. con la finalidad de observar el efecto del antibiótico sobre la superficie de aluminio.

En la Figura 15 se observa en el voltamograma de color negro y línea sólida, el primer ciclo de barrido de la superficie de aluminio puro en la solución de prueba a pH ácido (blanco); en esta Figura es posible observar un incremento de la corriente en la parte catódica de la gráfica debido al proceso de oxidación del aluminio en el rango de potenciales de -600 mV a +400 mV, notándose que las condiciones de corrosión mayores son de +150 mV a + 300 mV, esto debido al pico generado por el mayor aumento de corriente, con lo cual se genera una capa de óxidos que en el siguiente ciclo (línea punteada negra), éste disminuye la corrosión al realizar el mismo barrido de potencial. Comparando los voltamogramas del blanco de aluminio con el de aluminio en presencia de la cefalexina, se observa un comportamiento similar, con un ligero desplazamiento a la izquierda en el incremento de la parte de la reacción catódica, probablemente debido a que la

presencia de cefalexina favoreció la disolución de aluminio, con lo que, de igual manera, en el ciclo de barrido siguiente, la generación de la capa de óxido disminuye la corriente.

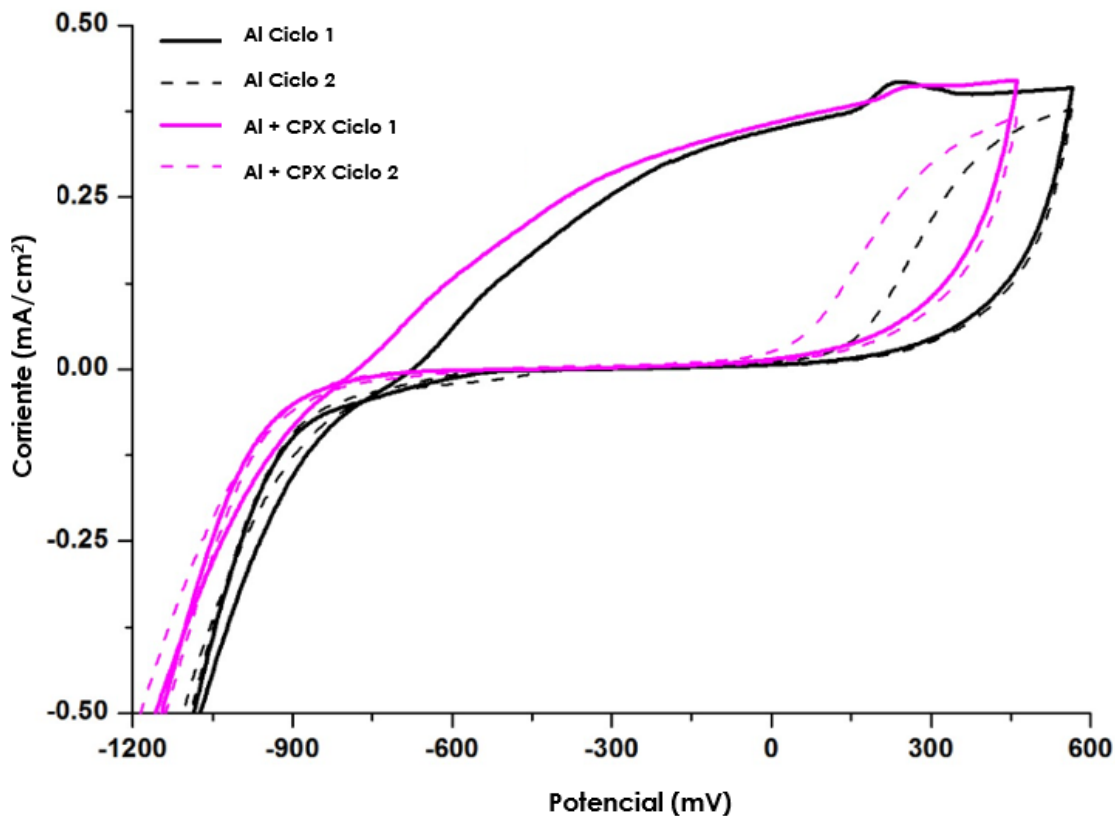


Figura 15. Voltamogramas de dos ciclos del aluminio en barrido de dos ciclos en ausencia y en presencia de 100 ppm de cefalexina en agua residual sintética a temperatura ambiente y pH 4

En el caso del sistema aluminio-agua, a pH neutro, se obtuvieron los siguientes voltamogramas en presencia y en ausencia del contaminante emergente (Ver Figura 16), donde, en ambos casos se observan ciclos con un ligero aumento en la corriente durante todo el rango del barrido del potencial, sin cambio aparente en presencia ni en ausencia de cefalexina, por lo que no se identifican zonas de activación del metal en estas condiciones.

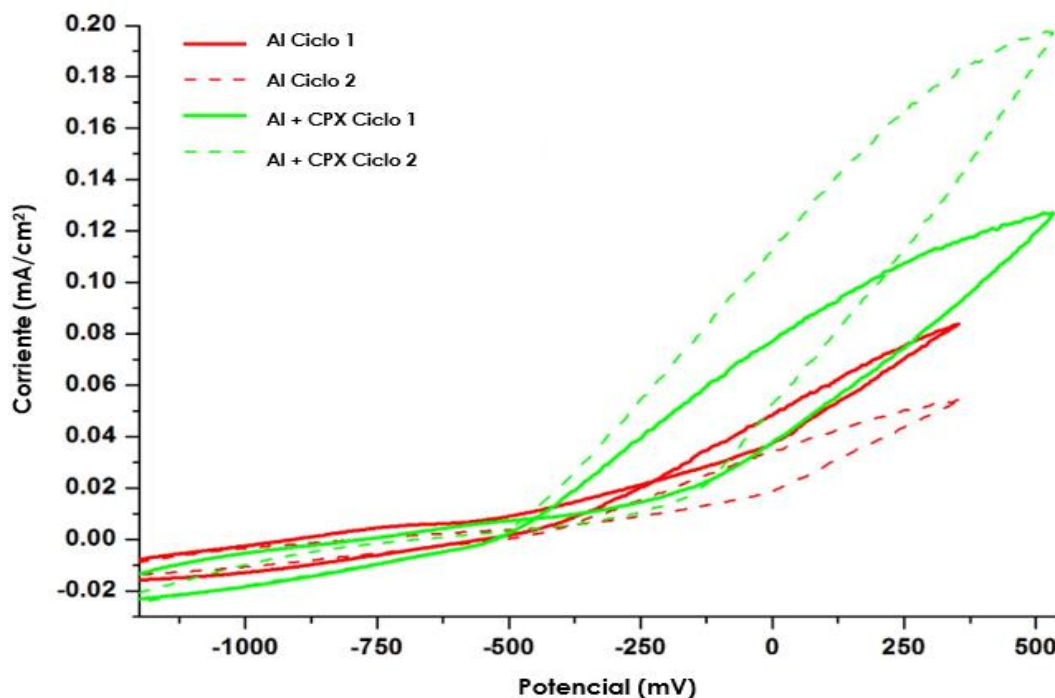


Figura 16. Voltamogramas de dos ciclos del aluminio en barrido de dos ciclos en ausencia y en presencia de 100 ppm de cefalexina en agua residual sintética a temperatura ambiente y pH 7

Sin embargo, en el sistema a pH básico, con aluminio puro, es posible notar que a partir de los -1500 mV se genera una activación del metal que incrementa la corriente de 0.025 mA a 0.25, es decir una orden de magnitud, que disminuye ligeramente conforme el potencial se desplaza a valores positivos. Además, cuando el potencial regresa en la segunda mitad del ciclo, se genera nuevamente un aumento en la corriente alrededor de +250 mV (curva naranja de línea sólida) con ligeros transitorios que generan pequeños picos en esta parte de la curva debido a la inestabilidad de los productos de corrosión de la superficie. Comparando el comportamiento del aluminio en medio alcalino, la curva azul en presencia de cefalexina muestra inicialmente un incremento en la corriente, debido a la activación de la superficie de aluminio, sin embargo, a +250 mV no aumentó la corriente, más bien, se mantuvo por debajo de 0.10 mA, debido a la adsorción de especies en la superficie que evitaron la disolución del metal. En el segundo ciclo en presencia de cefalexina, se

obtuvieron los valores de corriente más bajo con una línea de forma lisa, lo que corrobora el equilibrio y la estabilidad de la película formada en la superficie metálica en presencia del contaminante. La cual puede ser atribuida a la adsorción de la cefalexina sobre la superficie de aluminio una vez que éste es activado. Adicionalmente, la separación de los ciclos de velocidad de barrido se asocia a un comportamiento típico de reacción cuasi reversible (Saidman, S.B & Quinzani, O. V, 2004).

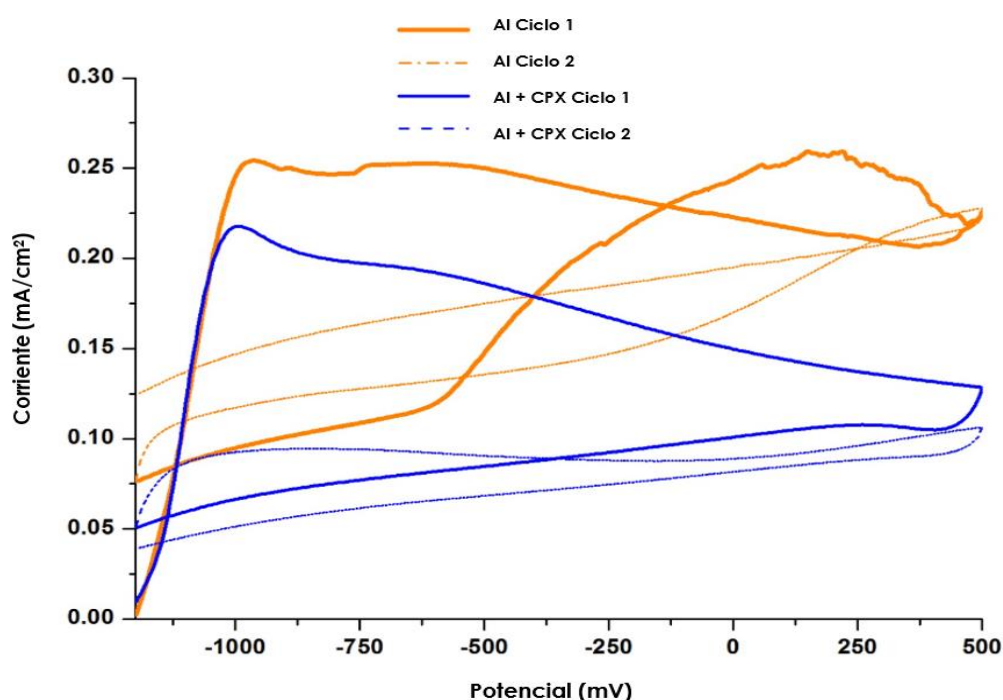


Figura 17. Voltamogramas de dos ciclos del aluminio en barrido de dos ciclos en ausencia y en presencia de 100 ppm de cefalexina en agua residual sintética a temperatura ambiente y pH 9

Por tanto, con el empleo de la voltamperometría cíclica se corrobora que el medio más adecuado para la activación del aluminio es en un pH básico, en el cual se produce una interacción con la cefalexina al grado que ésta es adsorbida sobre la superficie generando una película estable que evita la disolución posterior del aluminio conforme se continúa con el barrido en el siguiente ciclo, por lo que la interacción se cataloga como cuasi reversible.

Debido a los resultados anteriores, se decidió continuar con el tratamiento del agua residual sintética a pH 9 aplicando un potencial fijo de -310 mV considerado como un potencial de activación suficiente donde no se genera una disolución del metal máxima, con la intención de facilitar la adsorción de la cefalexina

1.2.Pruebas potenciostáticas

Para las pruebas potenciostáticas, es decir, pruebas de ruido en dominio del potencial, se utilizó una tarjeta prototipo diseñada por los alumnos de la carrera de Sistemas Computacionales, con la cual fue posible regular y fijar la potencia en -310 mV en tres diferentes tiempos: 15 minutos, 2 horas y 24 horas. Debido a que no fue necesario coleccionar los datos de la corriente, no se conectó ningún software, sin embargo, se realizó el estudio de las superficies y del electrolito, es decir del agua residual sintética después del tratamiento con el potencial.

La Figura 18, es una fotografía de las muestras tomadas a diferentes tiempos de una de las pruebas de ruido con potencial fijo descritas en la sección de la metodología (Ver Figura 12), con la intención de monitorear la evolución de la adsorción de la cefalexina y sobre la superficie del electrodo de aluminio.



Figura 18.Recolección de muestras durante el monitoreo en diferentes tiempos del tratamiento de una prueba potenciostática a pH básico y potencial fijo de -310 mV por dos horas, con la tarjeta prototipo elaborada por los alumnos de Sistemas Computacionales del TESCO

2. Estudios y análisis del electrolito

2.1. Espectrofotometría UV-Visible

El electrolito del cual se recolectaron las muestras en diferentes tiempos de tratamiento se estudió por medio de espectrofotometría de UV-Visible, donde de cada muestra se obtuvo un espectro de UV-Visible. En la Figura 19 se observan los espectros de la prueba potenciostática de la evolución de la cefalexina, dependiendo del tiempo de polarización de la superficie metálica, tomando una diferencia de 15 minutos entre cada toma de la muestra.

Se puede observar en los primeros 15 minutos (t_1) de la aplicación de los -310 mV la presencia de un pico característico de la cefalexina, ubicado a 270 nm con una absorbancia máxima de 1.25. No obstante, a lo largo de 30 min (t_2) existe un desplazamiento batocrómico en un rango de 270 a 280 nm, y un desplazamiento hipocrómico que disminuyó la absorbancia de 1.25 a 0.25.

El desplazamiento batocrómico se ha observado cuando ocurre oxidación en moléculas orgánicas bioactivas debido al grupo carboxílico insaturado, el cual está asociado con metales como lo son el Al (III) y Fe (III), según se reporta en la literatura (Malacaria, L, *et al*, 2021). De la muestra del tiempo tres (t_3) al ocho (t_8), el pico de 280 nm cambió a una absorbancia negativa que no representa descomposición de la cefalexina, pero si se asocia a la de un nuevo componente de 345 nm, lo que indica un movimiento hipocrómico proporcional al paso del tiempo (Rasmussen, T, *et al*, 2001). Finalmente, los cambios observados en las absorbancias y en los desplazamientos de los picos en esta técnica confirman que la cefalexina sufrió un cambio que puede atribuirse a la interacción con el aluminio cuando este se activa a un potencial de -310 mV durante un tiempo considerable.

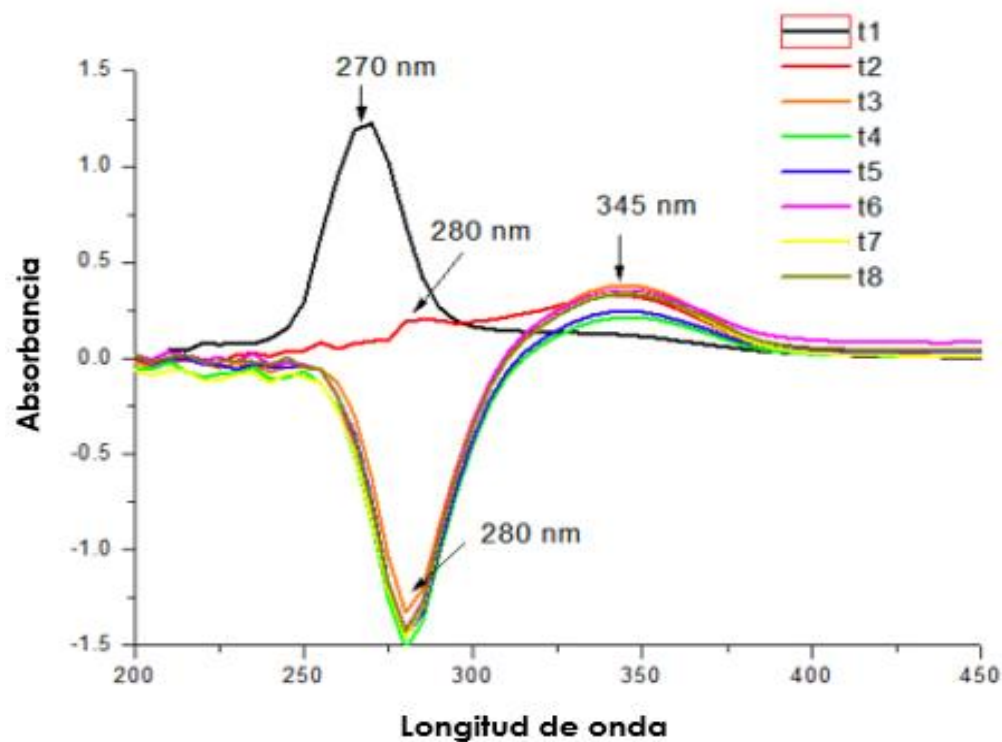


Figura 19. Monitoreo por espectrofotometría UV-vis de la prueba de ruido en dominio de potencial a -310 mV durante 2 horas en presencia de 100 ppm de cefalexina

2.2 Micrografías ópticas

Las superficies de las pruebas potencioestáticas de pH 9 con 100 ppm de cefalexina variando el parámetro del tiempo en dos horas y 48 horas (dos días), se estudiaron por medio de micrografías ópticas a 40 aumentos. La Figura 20 muestra la comparación de las superficies: 20a la superficie del aluminio puro en donde es posible observar una superficie brillante con rayaduras ocasionadas al pulir la superficie, sin embargo, no se perciben óxidos en la superficie. La Figura 20b donde se llevó a cabo el tratamiento aplicando el potencial durante dos horas, permite observar contrastes donde la mayoría de la superficie posee zonas opacas (color marrón oscuro) donde posiblemente se encuentran depositadas pequeñas fracciones del compuesto orgánico. Finalmente, la Figura 20c muestra que con un tratamiento de polarización de dos días; el aluminio sufre corrosión crítica,

generando picaduras sobre la superficie. Sin embargo, las zonas opacas se deben a los depósitos de la cefalexina, los cuales cubren el aluminio en su mayoría. Por lo tanto, en las micrografías es posible corroborar la generación de la película que según las pruebas voltamperométricas disminuyen la corrosión al ser adsorbida y recubren la superficie del electrodo.

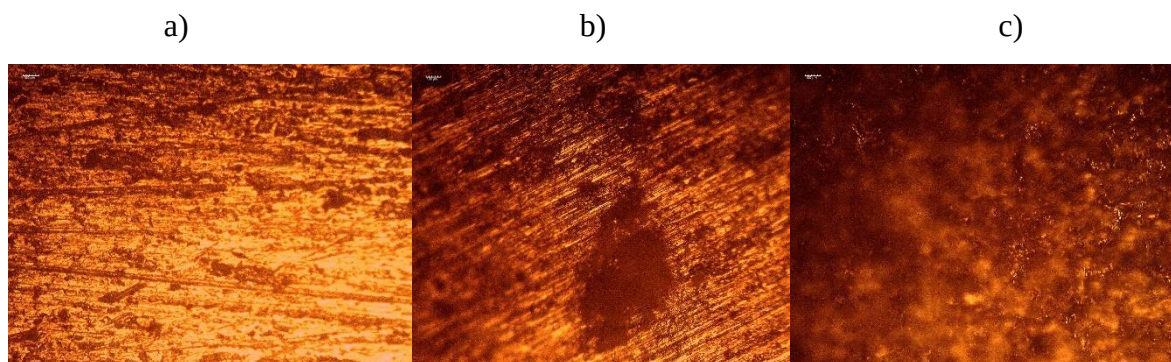


Figura 20. Comparación de micrografías de las superficies del electrodo de aluminio en dos diferentes tiempos de tratamiento con potencial de -310 mV a) aluminio puro antes de tratamiento, b) 2 horas y c) 2 días en presencia de cefalexina en medio básico

3. Estudio de los estados de la molécula de cefalexina

Dado que la cefalexina tiene dos pKa, es decir, el estado de acidez o de basicidad según el medio en el que ésta se encuentre disuelta. El pKa 1 sucede cuando la cefalexina contiene su grupo amino primario protonado por el medio, como es el caso de un medio básico y el pKa 2 ocurre cuando la cefalexina se encuentra en medio básico, y los iones de hidroxilo (OH^-) extraen el protón del ácido carboxílico, tal como lo ilustra Khosravi, R, et al, (2018).

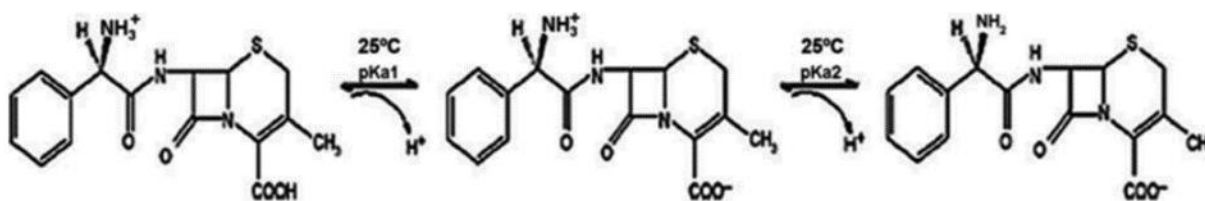


Figura 21. Diferentes estados de ionización de la cefalexina, según en el pH en las que se encuentra la cefalexina (Obtenido de: Khosravi, R, et al, 2018)

En la anterior Figura 21 se puede observar la cefalexina en sus tres estados, en el caso de este trabajo, el medio en el que se encontró la interacción con el metal fue el alcalino, en donde se pudo tomar como referencia el estado de la cefalexina con su pKa2 a temperatura ambiente. Se observa que en grupo carboxilo del anillo betalactámico se encuentra con carga negativa ya que los radicales OH⁻ del medio extraen el protón del COOH. Tomando en cuenta que el estado de activación del aluminio es cuando este sufre oxidación, es decir, la pérdida de electrones. Por tanto, se propone el siguiente mecanismo de interacción: el aluminio se encuentra en la forma Al³⁺ al momento de ser polarizado a -310 mV y se une al COO⁻ de la cefalexina que consecuentemente es “activada” por el medio alcalino. El siguiente diagrama describe el mecanismo de interacción propuesto.

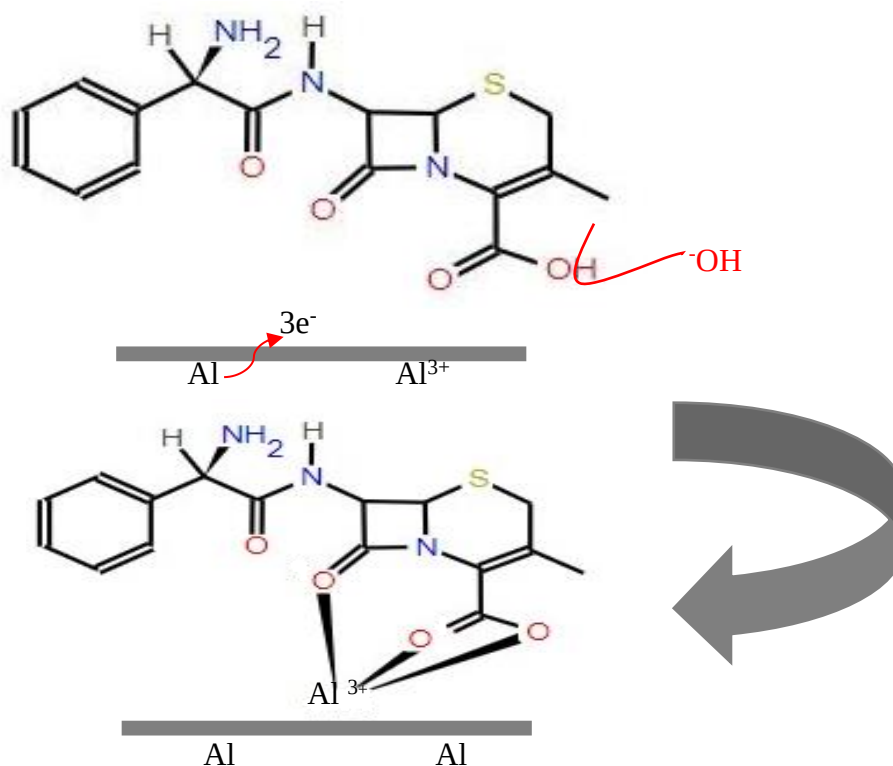


Figura 22. Propuesta de mecanismo de interacción aluminio-cefalexina

CONCLUSIONES

Conclusiones experimentales

Las pruebas voltamperométricas mostraron que las condiciones óptimas de activación de la superficie de aluminio y la activación de la Cefalexina son a pH básico (pH=9), y un potencial de -310 mV. Por lo que se fijó a este potencial realizando pruebas potenciostáticas, donde el estudio de las superficies en el microscopio permitió corroborar la adsorción de cefalexina conforme se incrementó el tiempo. Además, el estudio del agua residual sintética después del tratamiento mostró residuos de un nuevo compuesto que no era cefalexina, debido a la presencia de nuevos picos en longitudes de absorbanza diferentes a los de la cefalexina pura. Por tanto, se concluye como propuesta del mecanismo que el compuesto emergente cefalexina se coordina por medio de las zonas electronegativas situadas en los grupos carbonilo y carboxilo enlazados a su anillo betalactámico una vez que el aluminio se activa al perder los electrones y quedar como Al^{3+} . Por lo anterior, se corrobora que el aluminio puede ser una buena opción para la remoción de cefalexina como contaminante emergente.

Recomendaciones y sugerencias para trabajos futuros

Se recomienda realizar el estudio del tiempo óptimo y el porcentaje de eficiencia de adsorción de la cefalexina, así como las pruebas de ecotoxicidad del nuevo complejo Cefalexina-Aluminio con la intención de verificar si el nuevo complejo es menos tóxico que la cefalexina como contaminante emergente.

Competencias desarrolladas

- Diseña, selecciona, opera, optimiza y controla procesos en industrias químicas y de servicios con base en el desarrollo tecnológico de acuerdo con las normas de higiene y seguridad, de manera sustentable.

- Colabora en equipos interdisciplinarios y multiculturales en su ámbito laboral, con actitud, innovadora, espíritu crítico, disposición al cambio y apego a la ética profesional.
- Utiliza las tecnologías de la información y comunicación como herramientas en la construcción de soluciones a problemas de ingeniería y difundir el conocimiento científico y tecnológico.
- Realiza innovación y adaptación de tecnología en procesos aplicando la metodología científica, con respeto a la propiedad intelectual.
- Utiliza un segundo idioma en su ámbito laboral según los requerimientos del entorno.
- Se comunica en forma oral y escrita en el ámbito laboral de manera expedita y concisa.
- Demuestra actitudes de superación continua para lograr metas personales y profesionales con pertinencia y competitividad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abraham, E. P. (1987). Cephalosporins 1945–1986. *Drugs*, 34, 1-14.

Antibiotic resistance threatens everyone. (2023, 27 septiembre). Centers for Disease Control and Prevention. <https://www.cdc.gov/drugresistance/index.html>

Bard, A. J., & Faulkner, L. R. (2001). *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications*. John Wiley & Sons.

Basáez, L., & Vanýsek, P. (1999). Transport studies of β -lactam antibiotics and their degradation products across electrified water/oil interface. *Journal of pharmaceutical and biomedical analysis*, 19(1-2), 183-192.

Bockris, J. O. M., & Reddy, A. K. (2000). *Electrochemistry in materials science. Modern electrochemistry 2B: Electrode processes in chemistry, engineering, biology, and environmental science*, 1637-1788.

Chaudhary, T., Chaudhary, M. K., Joshi, B. D., de Santana, M. S. A., & Ayala, A. P. (2021). Spectroscopic (FT-IR, Raman) analysis and computational study on conformational geometry, AIM and biological activity of cephalexin from DFT and molecular docking approach. *Journal of Molecular Structure*, 1240, 130594.

Christian, G. D. (2009). *Química analítica*.

Compton, R. G., & Banks, C. E. (2018). *Understanding voltammetry*. World Scientific.

Conejo-Fernández, A. J., & Moraga-Llop, F. A. (2016). Enfermedades bacterianas de la piel. *PedInteg*, 20(3), 179-188.

- Craig, N. C. (2013). Charles M. Hall's persistent quest of patents for refining aluminum metal by electrolysis. *Bull. Hist. Chem*, 38(1), 13-18.
- Das N., Madhavan J., Selvi A., and Das D. (2019). An overview of cephalosporin antibiotics as emerging contaminants: a serious environmental concern. *3 Biothech* (2019) 9:231
- Davis, J. R. (Ed.). (1999). *Handbook of Aluminum: Volume 1: Physical Metallurgy and Processes*. CRC Press.)
- De la Cruz, N., Giménez, J., Esplugas, S., Grandjean, D., De Alencastro, L. F., & Pulgarin, C. (2012). Degradation of 32 emergent contaminants by UV and neutral photo-fenton in domestic wastewater effluent previously treated by activated sludge. *Water research*, 46(6), 1947-1957.
- Deblonde, T., Cossu-Leguille, C., & Hartemann, P. (2011). Emerging pollutants in wastewater: a review of the literature. *International journal of hygiene and environmental health*, 214(6), 442-448.
- Díaz, N. A., Ruiz, J. A. B., Reyes, E. F., Cejudo, A. G., Novo, J. J., Peinado, J. P., ... & Fiñana, I. T. (2010). *Espectrofometría: Espectros de absorción y cuantificación colorimétrica de biomoléculas*. Universidad de Córdoba, 1-8.
- Dreser, A., Wirtz, V. J., Corbett, K. K., & Echániz, G. (2008). Uso de antibióticos en México: revisión de problemas y políticas. *Salud pública de México*, 50, S480-S487.
- Elgrishi, N., Rountree, K. J., McCarthy, B. D., Rountree, E. S., Eisenhart, T. T., & Dempsey, J. L. (2018). A practical beginner's guide to cyclic voltammetry. *Journal of chemical education*, 95(2), 197-206.

- Fleming, A. (1929). On the antibacterial action of cultures of a penicillium, with special reference to their use in the isolation of B. influenzae. *British journal of experimental pathology*, 10(3), 226.
- Flores, E. (1995). Voltametría cíclica: la espectroscopía electroquímica. Parte I. *Revista de Química*, 9(2), 165-172.
- Fontana, M. G., & Greene, N. D. (1967). *Corrosion Engineering*.
- Gao, R., Mosquera-Romero, S., Ntagia, E., Wang, X., Rabaey, K., & Bonin, L. (2022). Electrochemical separation of organic and inorganic contaminants in wastewater. *Journal of The Electrochemical Society*, 169(3), 033505.
- García Martínez, E. M. (2012). Aplicación de la ley de Lambert-Beer en espectroscopía UV-visible.
- Garza Garza, M. D. L. (1999). Caracterización de precipitados en la aleación de aluminio 6061 por medio de microscopía de fuerza atómica (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León).
- Gómez de Saravia, S. G. (1991). Corrosion microbiológica de metales y aleaciones en medio marino (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de La Plata).
- González, A. (2021, 9 junio). Estructura cristalina. Lifeder. <https://www.lifeder.com/estructura-cristalina/>

- González-Núñez, M. A., & Uruchurtu-Chavarin, J. (2003). R/S fractal analysis of electrochemical noise signals of three organic coating samples under corrosion conditions. *Journal of Corrosion Science and Engineering*, 6, 1-5.
- González-Núñez, MA, & Uruchurtu-Chavarin, J. (2003). Análisis fractal R/S de señales de ruido electroquímico de tres muestras de recubrimiento orgánico en condiciones de corrosión. *Revista de ciencia e ingeniería de la corrosión*, 6, 1-5
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua | 14 de julio de 2015. Obtenido de <https://www.gob.mx/imta/articulos/el-imta-a-la-vanguardia-en-la-deteccion-de-contaminantes-emergentes-en-el-agua>, el 24 de enero del 2024.
- Jimenez C. 2011. Contaminantes orgánicos emergentes en el ambiente: productos farmacéuticos . *Revista Lasallista de Investigación* , 8:143-153
- Jiménez Cartagena, C. (2011). Contaminantes orgánicos emergentes en el ambiente: productos farmacéuticos. *Revista lasallista de investigación*, 8(2), 143-153.
- Jones, D. A. (1996). *Principles and Prevention of Corrosion* (2nd ed.). Prentice Hall.
- Khosravi, R., Zarei, A., Heidari, M., Ahmadvazeli, A., Vosughi, M., & Fazlzadeh, M. (2018). Application of ZnO and TiO₂ nanoparticles coated onto montmorillonite in the presence of H₂O₂ for efficient removal of cephalexin from aqueous solutions. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 35, 1000-1008.
- Kissinger, P. T., & Heineman, W. R. (1983). *Laboratory Techniques in Electroanalytical Chemistry*. Marcel Dekker

- Klein E. Y., Van Boeckel T.P., Martínez E. M., Pant S., Gandra S., Levin S.A., Goossens H., and Laxminarayan R. (2018) Global increase and geographic convergence in antibiotic consumption between 2000 and 2015. PNAS Vol. 115-15. Doi. 10.1073/pnas.17172951
- Kümmerer, K. (2009). Antibiotics in the aquatic environment—a review—part I. Chemosphere, 75(4), 417-434.
- Lesho E.P., and Laguio-Vila M. (2019) The Slow-Motion Catastrophe of Antimicrobial Resistance and Practical Interventions for All Prescribers, Mayo Clinic Proceedings, Volume 94, Issue 6, 2019, 1040-1047. Doi.10.1016/j.mayocp.2018.11.005
- Levy, S. B. (1998). The challenge of antibiotic resistance. Scientific American, 278(3), 46-53.
- Liaw, P.K., & David, S.A. (2017). Aluminium anodization: A review of fundamentals, processes, and applications. Journal of Materials Science and Technology, 33(6), 777-791
- Liu, S., Zhao, H., Lehmler, H. J., Cai, X., & Chen, J. (2017). Antibiotic pollution in marine food webs in Laizhou Bay, North China: trophodynamics and human exposure implication. Environmental science & technology, 51(4), 2392-2400.
- Macdonald, J. R. (1992). Impedance spectroscopy. Annals of biomedical engineering, 20, 289-305.
- Maguiña-Vargas, C., Ugarte-Gil, C. A., & Montiel, M. (2006). Uso adecuado y racional de los antibióticos. Acta Médica Peruana, 23(1), 15-20.
- McMurry, J., Mondragón, C. H., & Pozo, V. G. (2008). Química orgánica (No. 547 M3QU5 2008). México: Cengage learning.

- Muñoz Portero, M. J. (2011). Características y usos de los diagramas de Pourbaix.
- Neu, H. C. (1992). The crisis in antibiotic resistance. *Science*, 257(5073), 1064-1073.
- Nikaido, H. (2003). Molecular basis of bacterial outer membrane permeability revisited. *Microbiology and molecular biology reviews*, 67(4), 593-656.
- Nuss, P., & Eckelman, M. J. (2014). Life cycle assessment of metals: a scientific synthesis. *PloS one*, 9(7), e101298.
- Obot, I. B., & Obi-Egbedi, N. O. (2010). Inhibition of aluminium corrosion in hydrochloric acid using nizoral and the effect of iodide ion addition. *E-journal of chemistry*, 7(3), 837-843.
- O'Neill, J. (2016). Tackling drug-resistant infections globally: final report and recommendations.
- Orr, G., & Golan, G. (2021). Crystalline quality in aluminium single crystals, characterized by X-Ray diffraction and Rocking-Curve analysis. *arXiv preprint arXiv:2107.08477*.
- Oturan, M. A., & Aaron, J. J. (2014). Advanced oxidation processes in water/wastewater treatment: principles and applications. A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 44(23), 2577-2641.
- Palacio Badel, D. A. (2020). Remoción de contaminantes emergentes del tipo antibiótico en sistemas acuosos mediante polielectrolitos lineales y entrecruzados.
- Pourbaix, M. (1974). *Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions*. National Association of Corrosion Engineers (NACE).

- Reichert, G., Hilgert, S., Fuchs, S., & Azevedo, J. C. R. (2019). Emerging contaminants and antibiotic resistance in the different environmental matrices of Latin America. *Environmental Pollution*, 255, 113140.
- Revie, R. W., & Uhlig, H. H. (2008). *Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering* (4th ed.). Wiley
- Revie, R. W., & Uhlig, H. H. (2008). *Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering* (4th ed.). Wiley.
- Rivas, K. B., Rivas, M. A., Dávila, E. L., & Rodríguez, M. (2002). Cefalosporinas: De la primera a la cuarta generación. *Revista de la Facultad de Medicina*, 25(2), 142-153.
- Rivera-Jaimes, J. A., Postigo, C., Melgoza-Alemán, R. M., Aceña, J., Barceló, D., & de Alda, M. L. (2018). Study of pharmaceuticals in surface and wastewater from Cuernavaca, Morelos, Mexico: Occurrence and environmental risk assessment. *Science of the Total Environment*, 613, 1263-1274.
- Roberge, P. R. (2008). *Handbook of Corrosion Engineering*. McGraw-Hill.
- Saji, V. S. (2010). A review on recent patents in corrosion inhibitors. *Recent Patents on Corrosion Science*, 2(1).
- Samaniego Gámez, P. O. (2019). *Corrosión electroquímica de aluminio 2099 anodizado para aplicaciones aeronáuticas* (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León).

- Sarmah, A. K., Meyer, M. T., & Boxall, A. B. (2006). A global perspective on the use, sales, exposure pathways, occurrence, fate, and effects of veterinary antibiotics (VAs) in the environment. *Chemosphere*, 65(5), 725-759.
- Scholz, F. (2010). *Electroanalytical methods* (Vol. 1). Berlin: Springer.
- Scholz, F. (2015). Voltammetric techniques of analysis: the essentials. *ChemTexts*, 1(4), 17.
- Skoog, D. A., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2017). *Principles of instrumental analysis*. Cengage learning.
- Sørensen, P. A., Kiil, S., Dam-Johansen, K., & Weinell, C. E. (2009). Anticorrosive coatings: A review. *Journal of Coatings Technology and Research*, 6(2), 135–176.
<https://doi.org/10.1007/s11998-008-9144-2>
- Speight, T. M., Brogden, R. N., & Avery, G. S. (1972). Cephalixin: a review of its antibacterial, pharmacological, and therapeutic properties. *Drugs*, 3, 9-78.
- Suárez, C., & Gudíol, F. (2009). Antibióticos betalactámicos. *Enfermedades infecciosas y microbiología clínica*, 27(2), 116-129.
- Tejada, C., Quiñonez, E., & Peña, M. (2014). Contaminantes emergentes en aguas: metabolitos de fármacos. Una revisión. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 10(1), 80-101.
- Uruchurtu, JC y Dawson, JL (1987). Análisis de ruido del aluminio puro bajo diferentes condiciones de picaduras. *Corrosión*, 43 (1), 19-26.

Woodford, N., Turton, J. F., & Livermore, D. M. (2011). Multiresistant Gram-negative bacteria: the role of high-risk clones in the dissemination of antibiotic resistance. *FEMS microbiology reviews*, 35(5), 736-755.

Zaffiri, L., Gardner, J., & Toledo-Pereyra, L. H. (2012). History of antibiotics. From salvarsan to cephalosporins. *Journal of Investigative Surgery*, 25(2), 67-77.

ANEXO



XI Encuentro de Química Inorgánica San Juan del Río, Querétaro, 2023

Se otorga la presente constancia de participación a:

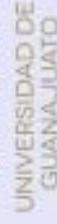
**López Aguilar, Samantha Giselle; Díaz Cárdenas,
María Yesenia, Bustos Terrones, Victoria, Uruchurtu
Chavarín, Jorge**

Por la presentación del cartel titulado **"Estudio de la interacción de cefalexina como
contaminante emergente por medio de electroquímica"**, en el marco del XI Encuentro
de Química Inorgánica en las instalaciones de la Universidad Tecnológica de San Juan
del Río en la ciudad de San Juan del Río, Querétaro, celebrado los días 14, 15, 16 y 17 de

agosto de 2023

Dr. René Antaño López
Director General CIDETEQ

Dr. Luis Antonio Ortiz-Frade
Coordinador EQI 2023



SOCIEDAD QUÍMICA
DE MÉXICO, A.C.