

Tratamiento de un surfactante comercial presente en el agua por el proceso fenton

Treatment of a commercial surfactant present in the water by the fenton process

Plata Saldívar, J. ^{1*}; Girón Navarro, R. ^{2*}; Garduño Pineda, L. ¹; García González, N. ¹,
Plata Saldívar, L. ¹

Recibido: 14 de octubre de 2022 – Aceptado: 7 de febrero de 2023

RESUMEN

El presente estudio se enfoca en el tratamiento de un surfactante ampliamente utilizado en diferentes productos comerciales de limpieza. Como primer paso, se realizó la degradación química del surfactante ácido dodecylbencensulfónico (ADBS) presente en agua mediante el proceso Fenton homogéneo utilizando diferentes valores de pH y

concentraciones de catalizador y peróxido de hidrógeno. Para la evaluación de estas condiciones se usó un diseño experimental central compuesto obtenido en el software *Statgraphics*. El sistema experimental consistió en un reactor *batch* (una sola entrada y salida) con agitación constante mediante la inyección de oxígeno por la parte superior usando una bomba de aire.

¹ Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán, Km.44.8, carretera Toluca-Atlaconulco, ejido de San Juan y San Agustín, C.P. 50700 Jocotitlán, Estado de México, México; ² Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias de Agua (IITCA), Universidad Autónoma del Estado de México, Km.14.5, carretera Toluca-Atlaconulco, C.P. 50200 Toluca, Estado de México, México

*Autores de correspondencia: pasajh1608@gmail.com, rgironn@alumno.uaemex.mx



De acuerdo con las gráficas de superficie de respuesta obtenidas en *Statgraphics*, el experimento para obtener una degradación completa del ADBS, en un tiempo menor de 2 horas, requiere $37.68 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de FeCl_3 y $53.41 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de H_2O_2 a un pH de 4.4. Los resultados demostraron que el factor con el mayor efecto significativo en la generación de radicales $\bullet\text{OH}$ es el pH, promoviendo la eliminación más rápida del surfactante en el agua. El avance de la degradación del ADBS fue valorado en diferentes tiempos: 0, 5, 10, 30, 60, 80, 100 y 120 minutos, obteniendo una cinética de primer orden y un tiempo de vida media de 2.01 minutos. Por otro lado, la caracterización de la solución con espectrofotometría Infrarroja, antes y después del tratamiento con el proceso Fenton, confirmó la reducción de varios grupos funcionales del surfactante en el agua tratada.

PALABRAS CLAVE: tensioactivos, ADBS, Fenton, aguas residuales, diseño experimental.

ABSTRACT

The present study focuses on the treatment of a surfactant widely used in different commercial cleaning products. As a first step, the chemical degradation of the surfactant dodecylbenzenesulfonic acid (ADBS) present in water was carried out through the homogeneous Fenton process using different

pH values and concentrations of catalyst and hydrogen peroxide. For the evaluation of these conditions, a composite central experimental design obtained in the *Statgraphics* software was used. The experimental system consisted of a batch reactor (single inlet and outlet) with constant agitation by injecting oxygen from the top using an air pump.

According to the response surface graphs obtained in *Statgraphics*, the experiment to obtain a complete degradation of ADBS, in less than 2 hours, requires $37.68 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ of FeCl_3 and $53.41 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ of H_2O_2 at a pH of 4.4. The results showed that the factor with the greatest significant effect on the generation of $\bullet\text{OH}$ radicals is pH, promoting the most rapid elimination of the surfactant in the water. The progress of ADBS degradation was assessed at different times: 0, 5, 10, 30, 60, 80, 100, and 120 minutes, obtaining first-order kinetics and a half-life of 2.01 minutes. On the other hand, the characterization of the solution with infrared spectrophotometry, before and after treatment with the Fenton process, confirmed the reduction of several functional groups of the surfactant in the treated water.

KEYWORDS: Surfactants, ADBS, Fenton, wastewater, experimental design.

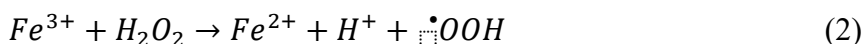
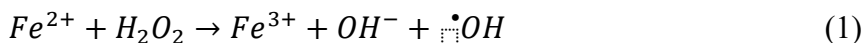
INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el uso desmedido de surfactantes en diferentes actividades antropogénicas ha generado una severa contaminación de los cuerpos de agua dulce (arroyos, ríos, lagos, acuíferos) y salada (mares y océanos), alterando sus parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de calidad. Los surfactantes o tensioactivos suelen utilizarse para formular grandes cantidades de productos comerciales químicos como champús, detergentes, dentífricos, enjuagues bucales, limpieza de textiles y suelos, lociones y fertilizantes agrícolas (Bhatt et al., 2020), siendo uno de los más utilizados el ácido dodecibenceno sulfónico lineal (ADBS), el cual comprende más del 40% de todos los surfactantes utilizados (Scott & Jones, 2000).

El ácido dodecibenceno sulfónico (ADBS) es un tensoactivo aniónico que tiene efectos negativos en la salud humana y el medio ambiente en altas concentraciones. Algunos estudios han reportado que posee un carácter tóxico y carcinógeno en los humanos, mientras que en los ecosistemas acuáticos promueve la eutrofización no controlada, dificulta la floculación y produce formación excesiva de espumas en los cuerpos de agua (Geng et al., 2020; Mirbahoush et al., 2019). Las aguas residuales contaminadas con los surfactantes, sin tratamiento previo, se descargan en los cuerpos receptores de agua ocasionando alteraciones fisiológicos en la flora y fauna de los ecosistemas presentes, además aumentan el riesgo de que las agua subterráneas se contaminen (Badmus et al., 2021; Sathe et al., 2021).

Para mitigar los efectos dañinos de los surfactantes en el agua, algunos estudios han reportado eficientes tratamientos que involucran el uso de técnicas de oxidación avanzada, específicamente el proceso Fenton. (Mirbahoush et al., 2019) obtuvo un 80.8% de eliminación del dodecil sulfato de sodio (SDS) aplicando un tratamiento acoplado de coagulación-Fenton, mientras que (Malakootian et al., 2016) para el SDS alcanzó un 71% usando el proceso Foto-Fenton. (Morillo Semanate et al., 2019) obtuvo una reducción de tensoactivos en aguas residuales del 97% con el proceso Fenton asistido de agentes quelantes. Estos estudios confirman la idoneidad del proceso Fenton para la eliminación de surfactantes, por lo conseguir la degradación del ADBS es de interés en la presente investigación, debido a que no ha sido reportado previamente.

El proceso Fenton es un POA eficaz basado en la producción de radicales $\bullet\text{OH}$ altamente reactivos debido a la rápida reacción entre los iones de hierro y H_2O_2 en condiciones ácidas (Ameta, 2018; Babuponnusami & Muthukumar, 2014). Las reacciones principales que ocurren en el proceso Fenton, involucran las ecuaciones (1) y (2) (Morillo Semanate et al., 2019; Zhang et al., 2019):



Algunas ventajas del proceso Fenton encontradas durante el desarrollo de la metodología fueron su realización simple, los tiempos de reacción cortos y la eliminación rápida del ADBS utilizando reactivos de bajo impacto ambiental (Aramyan, 2017).

Los objetivos del presente estudio fueron confirmar la degradación del surfactante aplicando el proceso Fenton homogéneo, evaluar las eficiencias del sistema propuesto Fe^{3+}/H_2O_2 , a través de las gráficas de superficie de respuesta, para hallar la condición óptima de degradabilidad, evaluar la cinética de reacción del ADBS y determinar las ventajas potenciales de aplicar escalar este sistema en futuras investigaciones.

MATERIALES Y MÉTODOS

Reactivos químicos

La mayoría de los reactivos empleados fueron grado reactivo: peróxido de hidrógeno (30%, J.T. Baker, H_2O_2) y cloruro de hierro (III) ($\geq 98\%$, Sigma-Aldrich, $FeCl_3$). El surfactante ácido dodecil benceno sulfónico (94%, ADBS) se compró en una tienda local de materias primas. Para todas las soluciones preparadas se utilizó agua destilada.

Métodos analíticos

La determinación del ADBS se llevó a cabo espectrofotométricamente mediante un espectrofotómetro UV-VIS modelo GENESYS 10S. Tras efectuar un barrido con distintas concentraciones, se obtuvo la longitud de onda del ADBS (240 nm). Las muestras también fueron analizadas mediante la espectrofotometría infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR) utilizando el equipo Magna-IRTM Spectrometer 550 Marca Nicolet y el programa Omnic para visualizar los espectros en un intervalo de 1000 cm^{-1} a 4000 cm^{-1} .

Procedimiento experimental

En la primera etapa, a partir del estado del arte y la estequiometría de la reacción, se propusieron las condiciones de operación para el tratamiento del ADBS señalados en la Tabla 1 (Babuponnusami & Muthukumar, 2014; Malakootian et al., 2016), las cuales se introdujeron al programa *Statgraphics* para obtener el diseño central compuesto presentado en la Tabla 2.

TABLA 1.
CONDICIONES DE OPERACIÓN

Tensoactivo ADBS:		30 mg·L ⁻¹	
Factores		Valor 1 (bajo)	Valor 2 (alto)
FeCl ₃		15 mg·L ⁻¹	60 mg·L ⁻¹
H ₂ O ₂		25 mg·L ⁻¹	80 mg·L ⁻¹
pH		3	6

El *software* creó un diseño compuesto central 2³+*est* para evaluar los efectos de 3 factores en 21 corridas, conteniendo bloques ortogonales, lo que permitió incluir puntos estrella en una distancia axial para estimar los términos del modelo y los efectos de bloque de forma independiente. Además, su ejecución fue en un solo bloque y el orden de los experimentos fue aleatorizado para aportar protección contra el efecto de variables ocultas. La cantidad del surfactante tratada en cada experimento fue de 30 mg·L⁻¹.

Proceso Fenton

En la segunda fase, para evaluar los experimentos de la Tabla 2, se montó un sistema de tratamiento que consistió en un reactor *batch* de vidrio borosilicato (una sola entrada y salida) con agitación constante mediante la inyección de oxígeno por la parte superior usando una bomba de aire. En este reactor la reacción ocurrió en un sistema cerrado, donde los reactivos FeCl₃, el H₂O₂ y el ADBS, se incorporaron al inicio del proceso Fenton (tiempo 0 minutos). La solución contenida en el reactor fue agitada durante 2 horas y se utilizó un volumen de 1 L por cada corrida experimental. En la tercera etapa, la concentración del ADBS presente en las muestras, fue monitoreada a los 0, 5, 10, 30, 60, 80, 100 y 120 minutos de tratamiento mediante espectrofotometría UV-VIS a una longitud de onda de 240 nm.

Una vez calculada la condición óptima para degradar completamente el ADBS (sección 3. Resultados), en la cuarta etapa, las muestras líquidas obtenidas antes y después del proceso Fenton (tiempo 0 y 240 minutos) fueron analizadas por espectrofotometría infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) leyendo los espectros a un rango de operación de 1000 cm⁻¹ hasta 4000 cm⁻¹ para finalmente identificar los grupos funcionales presentes y evaluar la eliminación del ADBS en las soluciones.

En la quinta fase, se realizó un estudio cinético basado en los modelos de orden cero, primer y segundo orden utilizando los datos experimentales obtenidos en la condición óptima para determinar las constantes cinéticas y los tiempos de vida media del surfactante ADBS.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Diseño experimental central compuesto

A partir de las concentraciones obtenidas en la etapa tres de la experimentación, fue posible calcular la eficiencia de la degradación del surfactante ADBS utilizando la ecuación 3.

$$D(\%) = \left[\frac{(C_0 - C)}{C_0} \right] \cdot 100 \quad (3)$$

Los porcentajes de degradación calculado para cada experimento se muestran en la Tabla 2.

TABLA 2.
PORCENTAJES DE DEGRADACIÓN

Exp.	FeCl ₃	H ₂ O ₂	pH	% Degradación
	mg·L ⁻¹	mg·L ⁻¹		%
1	37.5	52.5	4.5	100.00
2	37.5	52.5	6.86	65.80
3	2.06	52.5	4.5	100.00
4	72.93	52.5	4.5	55.27
5	37.5	52.5	2.13	14.58
6	15	25	3	11.12
7	37.5	52.5	4.5	100
8	15	80	3	0
9	60	25	6	69.51
10	37.5	9.18	4.5	78.92
11	37.5	52.5	4.5	100
12	37.5	95.81	4.5	100
13	37.5	52.5	4.5	100
14	60	80	6	100
15	15	25	6	70.76
16	60	25	3	63.29
17	60	80	3	58.33
18	37.5	52.5	4.5	100
19	37.5	52.5	4.5	100
20	37.5	52.5	4.5	100
21	15	80	6	40.34

Con los datos y resultados de la Tabla 2, se completó el diseño experimental en *Statgraphics*, obteniendo una colección de gráficos y tablas útiles para en el análisis de varianza (ANOVA), además se halló la condición óptima en la que existe mayor degradación de ADBS. En la Tabla 3 se presenta el análisis de varianza, donde se indican los efectos principales más significativos en el tratamiento propuesto:

TABLA 3.
ANÁLISIS DE VARIANZA

Factor	Suma de Cuadrados	Gl	Razón-F	Valor-P
A: FeCl₃	747.915	1	1.73	0.2154
B: H₂O₂	22.8027	1	0.05	0.8227
C: pH	4029.79	1	9.31	0.0110
AA	1696.89	1	3.92	0.0732
AB	562.298	1	1.30	0.2785
AC	339.171	1	0.78	0.3949
BB	598.793	1	1.38	0.2643
BC	32.6028	1	0.08	0.7888
CC	8863.92	1	20.48	0.0009
Error total	4760.23	11		
Total (corr.)	21654.4	20		

El coeficiente de correlación (R^2) obtenido fue 78.01%, lo cual indica un buen ajuste entre los resultados experimentales y las predicciones del modelo, es decir, el modelo así ajustado explica el 78 % de la variable de respuesta (%D) ilustrando el efecto de las concentraciones de H₂O₂, FeCl₃ y pH, además de sus interacciones. Además, el modelo fue ajustado con una $R^2_{ajustada} = 60\%$.

La Tabla 3 indica los factores que tienen un efecto significativo en la degradación del ADBS utilizando el estadístico del valor P. Si los factores tienen un valor de $p < 0.05$, son significativos y su nivel de confianza es del 95%. En este trabajo, el factor significativo fue el pH. El programa estadístico también ayudó a localizar los valores óptimos para lograr un porcentaje de degradación del 100%, los cuales se resumen en la Tabla 4.

TABLA 4.
CONDICIÓN ÓPTIMA

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
FeCl ₃	2.06167	72.9383	37.6824
H ₂ O ₂	9.18649	95.8135	53.4127
pH	2.13744	6.86256	4.42325

Como se observa en la Tabla 4, la condición óptima para una degradación completa del surfactante ADBS presente en el agua es: $37.68 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de FeCl_3 , $53.41 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de H_2O_2 y un pH ácido de 4.42. Estos resultados se confirman con la gráfica de superficie de respuesta (Figura 1).

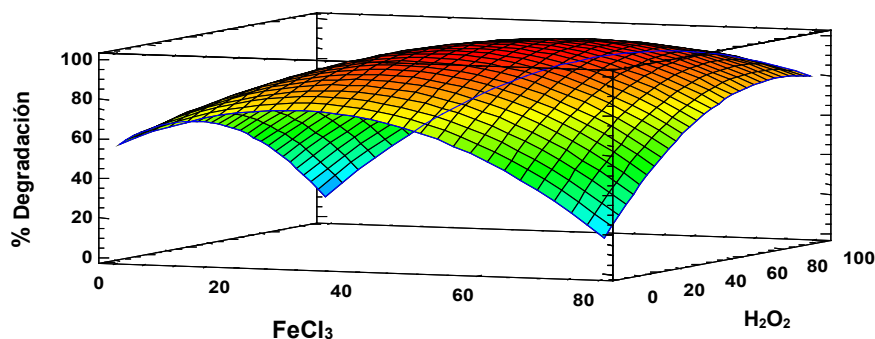


FIGURA 1.
SUPERFICIE 3D DE LA DEGRADACIÓN DEL ADBS (pH=4.4).

En la Figura 1, se observa que con $37.68 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de FeCl_3 y $53.41 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de H_2O_2 se alcanzó un porcentaje de degradación del 100%, el cual se identifica en la parte central de la gráfica con sombreado rojo. Con la condición optima se espera una generación idónea de radicales $\bullet\text{OH}$ durante el proceso Fenton, quienes son los encargados de degradar la molécula ADBS ($30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) a partir de la descomposición del H_2O_2 en presencia del catalizador FeCl_3 .

El proceso Fenton depende en gran medida de las condiciones de operación, como el pH de la solución y las concentraciones de Fe y H_2O_2 . No existen valores ideales para estos parámetros, por lo que es necesario evaluar las condiciones de funcionamiento óptimas para cada contaminante objetivo, considerando la estequiometría y la literatura reportada previamente.

Algunas investigaciones sobre el proceso Fenton, han demostrado que sólo es efectivo para un pH ácido, si existe un ambiente con pH neutro, se propicia la formación de hidróxidos, pero en lugar de que los radicales hidroxilos ataquen la molécula del surfactante, forman hidróxidos de hierro, lo que provoca precipitaciones e impide la degradación (Rubio-Clemente, 2017). En el presente trabajo, se obtuvo un pH ácido de 4.4 adecuado para degradar el surfactante ADBS, afirmando que, a valores de pH ácidos, el Fe^{3+} cumple su función como catalizador aumentando por más tiempo la capacidad oxidativa del reactivo. Simultáneamente, el H_2O_2 se descompone fácilmente generando especies reactiva como $\bullet\text{O}_2$, O_2 y $\bullet\text{OH}$, mejorando la degradación de los contaminantes orgánicos.

Los hallazgos encontrados coinciden con los reportados por otros autores, por ejemplo, (Sathe et al., 2021) determinaron que el tratamiento Fenton tiene una buena eficiencia a pH ácido, debido a que permite que el hierro se encuentra en solución mejorando su interacción con el H_2O_2 .

Por el contrario, a pH alcalino, el hierro precipita como $\text{Fe}(\text{OH})_3$, afectando su disponibilidad para reaccionar con el H_2O_2 y limitando la generación de radicales $\bullet\text{OH}$. No obstante, acondicionar las muestras a pH ácido, implica limitaciones ya que requerirá una inversión mayor para escalarlo al tratamiento a las aguas residuales, además a un pH ácido, el riesgo de que el hierro lixivie es mayor. Para encontrar una solución a esta desventaja, es indispensable continuar con el estudio de esta línea investigación, encontrando nuevos tratamientos que se desarrollen a pH neutro (Sathe et al., 2021). Por otra parte, algunas ventajas del proceso Fenton, destacadas durante la experimentación, fueron el corto tiempo de reacción, el montaje experimental sencillo, catalizador de bajo costo y no tóxico, no necesitó energía externa para activar el H_2O_2 y se llevó a cabo a presión y temperatura ambiente (Mirzaei et al., 2017; Vasquez-Medrano et al., 2018).

Comparando los valores de la condición óptima obtenidos con los reportados por otros estudios, es notable la diferencia debido a que no degradan el mismo surfactante. (Malakootian et al., 2016) con $\text{pH}=3$, $\text{H}_2\text{O}_2=0.5 \text{ mM}$ y $\text{Fe}^{2+}=40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ obtuvo un 71% de remoción del dodecil sulfato de sodio ($25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$). La concentración de hierro utilizada es mayor que la del presente estudio, sin embargo, ocurre lo contrario con la concentración de H_2O_2 , es decir, el autor utilizó menor concentración del oxidante. Con base en esto, el tratamiento propuesto es una opción viable para conseguir una degradación completa del surfactante utilizando un catalizador de Fe^{3+} en lugar de Fe^{2+} .

Por su parte, (Morillo Semanate et al., 2019) reportó la eficiencia del tratamiento Fenton sobre aguas residuales domésticas contaminadas con tensioactivos, en donde las mejores condiciones fueron $\text{H}_2\text{O}_2=56.33 \text{ mM}$, una relación molar $\text{Fe}^{2+}:\text{H}_2\text{O}_2$ de 1:9 a pH neutro. Al comparar la relación molar anterior (1:9) con la del presente estudio (1:4), se aprecia que la concentración de H_2O_2 empleada es menor, derivado del uso de agente quelantes y del gran volumen de agua tratada.

Caracterización por FTIR

El surfactante ADBS comercial y las muestras obtenidas antes y después del tratamiento, fueron analizadas de manera cualitativa a través de la espectrofotometría en el infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR) para identificar los grupos funcionales presentes. En la Figura 2 se presenta el espectro infrarrojo del ADBS.

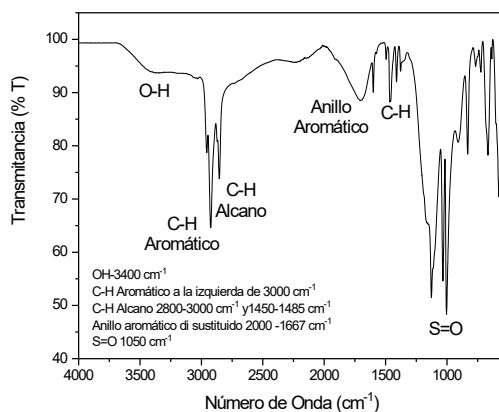


FIGURA 2.
ESPECTRO IR DEL SURFACTANTE ADBS.

Como se observa en la Figura 2, los grupos funcionales identificados fueron alcanos (C-H), aromáticos (C-H) y sulfonatos (S=O), confirmando la fórmula química del ADBS reportada por la literatura ($C_{18}H_{30}SO_3$).

La Figura 3 muestra el espectro FTIR del surfactante ADBS en el minuto 0 del tratamiento, es decir, con $30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de ADBS, $37.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de catalizador, $53.41 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de H_2O_2 y un pH ácido de 4.4.

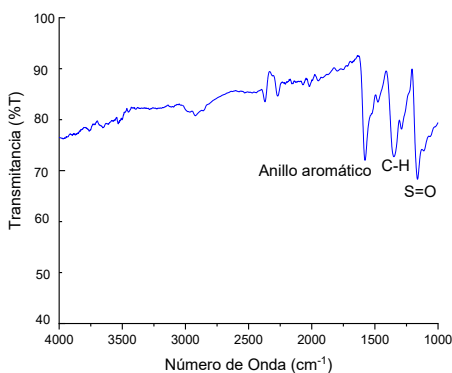


FIGURA 3.
ESPECTRO FTIR DEL ADBS EN EL MINUTO 0.

En la Figura 3, se observan picos amplios en 1100 cm^{-1} que correspondiente al enlace S=O, también está presente el grupo funcional alcano (C-H) en las longitudes de onda que van de 1250 a 1400 cm^{-1} . El enlace correspondiente al anillo aromático di sustituido está presente en la longitud de onda 1600 cm^{-1} . También se observan enlaces O-H debido a la presencia de agua en las

longitudes de onda $2700\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$, sin embargo, se restó del espectro del agua para visualizar con mayor claridad el ADBS.

El espectro infrarrojo de la solución tratada, es decir, después de aplicar el proceso Fenton por 120 minutos, se muestra en la Figura 4. En este espectro se visualizan dos picos correspondientes al enlace O-H, lo que nos indica presencia de agua. De esta manera, no hay presencia de grupos funcionales pertenecientes al ADBS o intermedios, por ende, se confirma que la degradación del surfactante es completa usando $37.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de FeCl_3 , $53.41\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de H_2O_2 y un pH ácido de 4.4.

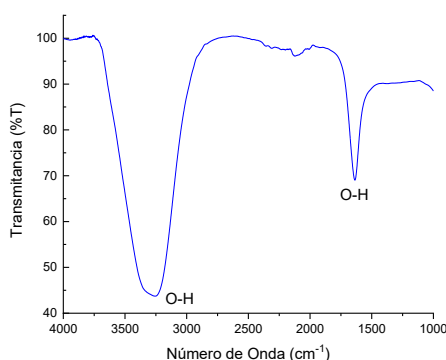


FIGURA 4.
 ESPECTRO FTIR DEL ADBS EN EL MINUTO 120.

Cinética de degradación del ADBS

A partir del experimento con las condiciones óptimas, se recopilieron los datos de concentración para hallar las cinéticas de reacción con las ecuaciones de primer orden, segundo orden y orden cero. El experimento se ajustó a un modelo de primer orden (Figura 5).

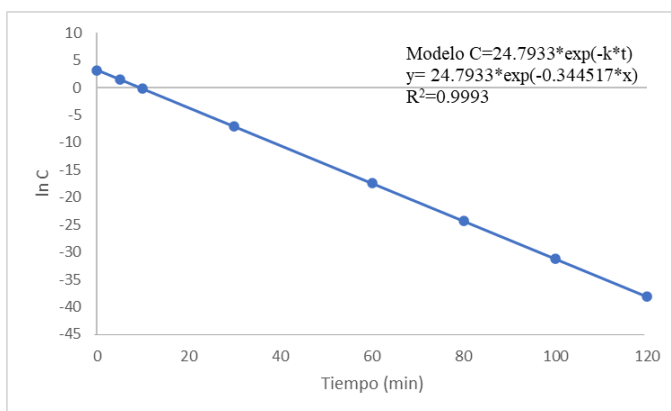


FIGURA 5.
 MODELO DE PRIMER ORDEN (C : CONCENTRACIÓN, k : CONSTANTE CINÉTICA, t : TIEMPO).

A partir de las gráficas obtenidas para cada modelo usado, se observó que el experimento óptimo para degradar el surfactante ADBS se ajustó a una cinética de primer orden debido a que arrojó un valor de correlación de 0.9993 (R^2), indicando el grado de dependencia entre las variables tiempo y concentración. También, con las ecuaciones cinéticas se obtuvo la concentración en cualquier tiempo, dentro del intervalo 0-120 minutos, y el coeficiente de determinación obtenido para comparar la correlación de los datos entre el eje x y eje y de cada ecuación. Las cinéticas de reacción son ecuaciones matemáticas que describieron la velocidad de degradación del surfactante ADBS en 2 horas.

La constante cinética (k) obtenida fue de 0.3445 min^{-1} para el modelo de primer orden. Con este resultado se determinó la rapidez de la reacción a través del tiempo de vida media, el cual indicó el tiempo requerido para disminuir a la mitad la concentración del surfactante ADBS en el agua. La vida media obtenida fue 2.0115 minutos (primer orden), lo que nos confirma que la degradación fue rápida. En otras palabras, para que la concentración del surfactante ADBS se reduzca de $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ a $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, se requiere aplicar el proceso Fenton durante 2.0115 minutos.

(Mirbahoush et al., 2019) reportó la remoción del surfactante SDS con el proceso foto-Fenton, donde los datos experimentales se ajustaron a un modelo de primer orden. Por su parte, (Ono et al., 2012) describió la tasa de degradación de un surfactante aniónico mediante una cinética de pseudo-primer orden usando el proceso foto-Fenton, obteniendo una $k=0.0269 \text{ min}^{-1}$, lo que indica una velocidad de reacción más lenta que la obtenida en el presente estudio.

CONCLUSIONES

El tratamiento del ADBS con el proceso Fenton es eficiente, convirtiéndolo en una opción interesante para tratar aguas contaminadas con este surfactante ya que promueve su rápida degradación.

La degradación eficiente se atribuye a la generación de radicales hidroxilo ($\bullet\text{OH}$) cuando se controla las concentraciones de H_2O_2 y FeCl_3 añadidas al proceso. Aunado a ello, el pH es el factor más significativo encontrado que contribuye a esta generación de especies reactivas, promoviendo la conversión del surfactante ADBS en compuestos de cadena más cortas.

Para evaluar y conocer las concentraciones óptimas de reactivos y pH se utilizó un diseño experimental central compuesto. La completa degradación del ADBS (100%) ocurrió cuando se utilizaron $53.41 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ H}_2\text{O}_2$, $37.68 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ FeCl}_3$ y un pH de 4.4 en un tiempo de tratamiento menor a 10 minutos.

El presente estudio es un antecedente para degradar surfactantes a escala laboratorio, por lo que los hallazgos encontrados pretenden ayudar a su escalamiento a plantas pilotos en futuras investigaciones. Por otro lado, El valor de pH abre una puerta para nuevos estudios que promuevan el uso del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales reales y superen el inconveniente del medio ácido, permitiendo trabajar a condiciones neutras, para cumplir con la normatividad mexicana vigente.

REFERENCIAS

- Ameta, S. C. (2018). Introduction. *Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment: Emerging Green Chemical Technology*, 1–12. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-810499-6.00001-2>
- Aramyan, S. M. (2017). Advances in Fenton and Fenton Based Oxidation Processes for Industrial Effluent Contaminants Control-A Review. *International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources*, 2(4). <https://doi.org/10.19080/ijesnr.2017.02.555594>
- Babuponnusami, A., & Muthukumar, K. (2014). A review on Fenton and improvements to the Fenton process for wastewater treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2(1), 557–572. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2013.10.011>
- Badmus, S. O., Amusa, H. K., Oyehan, T. A., & Saleh, T. A. (2021). Environmental risks and toxicity of surfactants: overview of analysis, assessment, and remediation techniques. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(44), 62085–62104. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16483-w>
- Bhatt, J., Rai, A. K., Gupta, M., Vyas, S., Ameta, R., Ameta, S. C., Chavoshani, A., & Hashemi, M. (2020). Surfactants: an emerging face of pollution. In *Micropollutants and Challenges* (pp. 145–178). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818612-1.00004-0>
- Geng, Y., Huang, J., Tan, B., Xu, Y., Li, P., & Xu, J. (2020). Efficient synthesis of dodecylbenzene sulfonic acid in microreaction systems. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 149(February), 107858. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.107858>
- Malakootian, M., Jaafarzadeh, N., & Dehdarirad, A. (2016). Efficiency investigation of photo-Fenton process in removal of sodium dodecyl sulphate from aqueous solutions. *Desalination and Water Treatment*, 57(51), 24444–24449. <https://doi.org/10.1080/19443994.2016.1140082>
- Mirbahoush, S. M., Chaibakhsh, N., & Moradi-Shoeili, Z. (2019). Highly efficient removal of

- surfactant from industrial effluents using flaxseed mucilage in coagulation/photo-Fenton oxidation process. *Chemosphere*, 231, 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.05.118>
- Mirzaei, A., Chen, Z., Haghighat, F., & Yerushalmi, L. (2017). Removal of pharmaceuticals from water by homo/heterogeneous Fenton-type processes – A review. *Chemosphere*, 174, 665–688. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.02.019>
- Morillo Semanate, L. D., Naranjo Tovar, D. A., Pérez, J., Villacis Oñate, W. E., Vargas Jentzsch, P., & Mufloz Bisesti, F. (2019). REMOCIÓN DE TENSOACTIVOS Y COLIFORMES EN AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS MEDIANTE PROCESOS FENTON. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 35(4), 931–943. <https://doi.org/10.20937/RICA.2019.35.04.12>
- Ono, E., Tokumura, M., & Kawase, Y. (2012). Photo-Fenton degradation of non-ionic surfactant and its mixture with cationic or anionic surfactant. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 47(8), 1087–1095. <https://doi.org/10.1080/10934529.2012.668034>
- Sathe, S. M., Chakraborty, I., Sankar Cheela, V. R., Chowdhury, S., Dubey, B. K., & Ghangrekar, M. M. (2021). A novel bio-electro-Fenton process for eliminating sodium dodecyl sulphate from wastewater using dual chamber microbial fuel cell. *Bioresource Technology*, 341(July), 125850. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125850>
- Scott, M. J., & Jones, M. N. (2000). The biodegradation of surfactants in the environment. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Biomembranes*, 1508(1–2), 235–251. [https://doi.org/10.1016/S0304-4157\(00\)00013-7](https://doi.org/10.1016/S0304-4157(00)00013-7)
- Vasquez-Medrano, R., Prato-Garcia, D., & Vedrenne, M. (2018). Ferrioxalate-Mediated Processes. In *Advanced Oxidation Processes for Waste Water Treatment* (Vol. 243, pp. 89–113). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-810499-6.00004-8>
- Zhang, M., Dong, H., Zhao, L., Wang, D., & Meng, D. (2019). A review on Fenton process for organic wastewater treatment based on optimization perspective. *Science of The Total Environment*, 670, 110–121. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.180>