



DOI: <http://dx.doi.org/10.23857/dc.v8i3>

Ciencias Naturales, Artes y Letras
Artículo de Investigación

Tratamiento con ozono de aguas contaminadas con compuestos orgánicos volátiles

The meaning of the school as a social construction contextualized in the peasant collective identity: Case study in the rural sector

O significado da escola como construção social contextualizada na identidade coletiva camponesa: estudo de caso no setor rural

Barahona Natalia ^I

natalia.barahona@epoch.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-3946-9642>

Hernán Tixi ^{II}

hernantaxi@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-5352-1545>

Garmendia H ^{III}

Garmendiah@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-5214-176X>

Correspondencia: natalia.barahona@epoch.edu.ec

***Recibido:** 29 de mayo del 2022 ***Aceptado:** 02 de junio de 2022 * **Publicado:** 06 de julio de 2022

- I. Escuela Superior Politécnica Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- II. Escuela Superior Politécnica Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- III. Facultad de Ingeniería, Laboratorio de Petróleo y Catálisis, ULA, Mérida, Venezuela.

Resumen

Los compuestos orgánicos volátiles (COVs) son tóxicos para el medio ambiente y la salud. La tendencia de volatilizarse fácilmente desde las aguas industriales a la atmósfera provocando problemas ambientales. El objetivo de esta investigación fue evaluar el tratamiento con ozono de aguas contaminadas con compuestos orgánicos volátiles (COV) en una unidad semi-batch. El equipo diseñado para la investigación representa a escala un sistema de ozonización que consta principalmente de una cuba de vidrio con un difusor poroso y un generador de ozono. Los COV tratados fueron 2-propanol, tolueno y fenol. Para los ensayos se prepararon efluentes simulados utilizando agua destilada, a 1000 ppm de 2-propanol, tolueno y fenol. Se evaluó la saturación de ozono (O₃) en el agua y la variación del pH, para determinar el grado de oxidación de los compuestos orgánicos con ozono. El proceso se realizó en forma semi-continua hasta lograr la máxima oxidación del COV, realizándose la recolección de las muestras en intervalos de 5 min, para las muestras contaminadas con 2-propanol y tolueno y cada hora para las muestras contaminadas con fenol. El sistema de ozonización es eficaz para la eliminación de los COV, logrando una reducción del 96%.

Palabras Claves: Compuestos orgánicos volátiles; Proceso de ozonización.

Abstract

Volatile organic compounds (VOCs) are toxic to the environment and health. The tendency to volatilize easily from industrial waters to the atmosphere causing environmental problems. The objective of this research was to evaluate the ozone treatment of water contaminated with volatile organic compounds (VOC) in a semi-batch unit. The equipment designed for the research represents to scale an ozonation system that consists mainly of a glass tank with a porous diffuser and an ozone generator. The VOCs treated were 2-propanol, toluene and phenol. For the tests, simulated effluents were prepared using distilled water, at 1000 ppm of 2-propanol, toluene and phenol. Ozone saturation (O₃) in the water and pH variation were evaluated to determine the degree of oxidation of organic compounds with ozone. The process was carried out semi-continuously until maximum VOC oxidation was achieved, with sample collection at 5 min intervals for samples contaminated with 2-propanol and toluene and every hour for samples contaminated with phenol. The ozonation system is effective in eliminating VOCs, achieving a 96% reduction.

Keywords: Volatile Organic Compounds; ozonation process.

Resumo

Os compostos orgânicos voláteis (COVs) são tóxicos ao meio ambiente e à saúde. A tendência de volatilizar facilmente das águas industriais para a atmosfera causando problemas ambientais. O objetivo desta pesquisa foi avaliar o tratamento com ozônio de água contaminada com compostos orgânicos voláteis (COV) em uma unidade semi-lote. O equipamento projetado para a pesquisa representa dimensionar um sistema de ozonização que consiste principalmente em um tanque de vidro com um difusor poroso e um gerador de ozônio. Os COVs tratados foram 2-propanol, tolueno e fenol. Para os testes, efluentes simulados foram preparados utilizando água destilada, a 1000 ppm de 2-propanol, tolueno e fenol. A saturação do ozônio (O₃) na água e a variação do pH foram avaliadas para determinar o grau de oxidação dos compostos orgânicos com o ozônio. O processo foi realizado de forma semicontínua até atingir a máxima oxidação de COV, com coleta de amostras em intervalos de 5 minutos para amostras contaminadas com 2-propanol e tolueno e a cada hora para amostras contaminadas com fenol. O sistema de ozonização é eficaz na eliminação de VOCs, atingindo uma redução de 96%.

Palavras-chave: Compostos orgânicos voláteis; processo de ozonização.

Introducción

Los compuestos orgánicos volátiles (COV), son emitidos por diversos procesos industriales dentro de las industrias de refinación de petróleo, las farmacéuticas, las petroquímicas y las industrias químicas, las cuales se consideran las primeras fuentes de contaminación ambiental dentro y fuera de estas instalaciones [1]. Los COVs se define como una clase de compuestos orgánicos con una presión de vapor saturado superior a 133,32 Pa a temperatura ambiente, o un punto de ebullición entre 50 y 260 °C a presión atmosférica, o cualquier sólido o líquido orgánico volátil a temperatura y presión normales [2,3].

Los COVs son usados para fabricar solventes, limpiadores y desengrasantes los cuales se encuentran en muchos productos industriales y del hogar [4]. El escape de estas sustancias siempre termina en los cuerpos de agua, generando problemas de contaminación. Durante el tratamiento de estos efluentes en plantas de tratamiento aguas industriales o residuales, estos pasan a dispersarse en el aire desde la fase líquida a temperatura ambiente. La EPA [5] ha declarado que 34 de los 114 tipos de contaminantes orgánicos prioritarios en el agua son compuestos orgánicos volátiles. Las aguas

Tratamiento con ozono de aguas contaminadas con compuestos orgánicos volátiles

residuales, especialmente las industriales, con un alto contenido de COV, son la fuente de emisiones de COV durante los procesos de tratamiento.

Los COVs pueden ser liberados al medio ambiente durante su producción, distribución, almacenamiento y uso [6]. Durante el procesamiento de crudos pesados para obtener coque, las aguas residuales de estas plantas contienen componentes complejos los cuales presentan un gran número de contaminantes orgánicos, incluyendo alcanos de cadena larga, fenoles, compuestos aromáticos policíclicos, benceno y otros compuestos orgánicos. [7,8]

Los contaminantes de tipo fenólico se encuentran con frecuencia en muchas corrientes de aguas residuales industriales. Estos residuos fenólicos son en gran medida resistentes a la degradación biológica en la planta de tratamiento de aguas residuales municipales [9]. La contaminación de los suministros municipales de agua por fenol se ha convertido en un grave problema en casi todas las grandes ciudades. Concentraciones mínimas de sólo 0,0025 mg/L provocan sabores desagradables en el agua potable y también afectan al aspecto de los peces. A concentraciones más altas son tóxicas para los peces [10]. Cuando las aguas que contienen fenol se desinfectan con cloro en la planta de tratamiento de aguas residuales o de agua potable, el cloro añadido al agua reacciona con el fenol para producir clorofenol, que es más tóxico, más odorífero y tiene un sabor más desagradable que el propio fenol [11].

El tolueno es uno de los contaminantes orgánicos que merecen esta atención debido a sus propiedades químicas y físicas análogas a las del fenol, que incluyen una alta toxicidad, una pronunciada mutagenicidad y una carcinogenicidad discutible [12]. Su exposición al ser humano en concentraciones críticas puede provocar lesiones en la piel, fallos orgánicos, hemorragias internas y shock séptico [13]. El amplio uso del tolueno en la industria de la pintura, petroquímica [14] y su utilidad en la producción de solventes, desinfectantes, herbicidas, explosivos, tintes, aumenta aún más las probabilidades de que se produzcan fugas no deseadas. Varios trabajos de investigación sobre la contención del tolueno incluyen la degradación fotocatalizada y la mineralización [15], el proceso de manto de lodo anaeróbico de flujo ascendente [16], la biodegradación [16] y la oxidación mediante los reactivos de Fenton [17], el proceso electroquímico [18] y el ozono [19].

El alcohol isopropílico (IPA) es un contaminante importante en las aguas residuales de la industria de fabricación de semiconductores. Este se usa como disolvente especialmente como agente de limpieza y lavado en las industrias electrónica y de semiconductores. Por lo tanto, se consume una cantidad masiva de IPA y se vierte como disolvente residual de estas industrias. Las tecnologías

Tratamiento con ozono de aguas contaminadas con compuestos orgánicos volátiles

convencionales de tratamiento de residuos de disolventes incluyen la incineración, la destilación y la pre-evaporación [20-21].

La ozonización es una alternativa de tratamiento técnicamente viable para alcanzar las estrictas limitaciones de los efluentes [22]. El ozono ha demostrado su eficacia en el tratamiento de numerosas sustancias químicas tóxicas, entre ellas: cianuro de hidrógeno, ácido acético, formaldehído, benceno, acetona, xileno, glicerol, tolueno, amoníaco y detergentes no iónicos. Para algunos compuestos puede ser necesario combinar el tratamiento con ozono con luz ultravioleta, peróxido de hidrógeno, ultrasonido o catalizadores [23]. El ozono es un oxidante fuerte que es capaz de reaccionar a través de dos mecanismos de reacción diferentes, denominados ozonización directa e indirecta [24]. Así, el ozono puede reaccionar directamente con ciertos grupos funcionales de los compuestos orgánicos que se encuentran en el agua y en las aguas residuales, como los hidrocarburos insaturados y aromáticos con sustituyentes como los grupos hidroxilo, metilo y amina, a través de reacciones de adición cíclica dipolar 1, 3 y electrofílica, dando lugar a productos de degradación. Por otro lado, el ozono se descompone en el agua para formar radicales hidroxilo (HO.) que son agentes oxidantes más fuertes que el propio ozono, induciendo así la llamada ozonación indirecta. Existen estudios bien reconocidos sobre los mecanismos de generación de HO. a través de la descomposición del ozono en el agua [25]. La descomposición del ozono en el agua puede ser iniciada por el anión hidroxilo HO⁻ y, por tanto, la oxidación indirecta del ozono se ve favorecida en condiciones de pH alcalino. En estas condiciones, la ozonización se convierte en un proceso de oxidación avanzada [26].

En la presente investigación se estudia el tratamiento de los compuestos orgánicos fenol, tolueno y alcohol isopropílico como compuestos orgánicos volátiles usando como oxidante el ozono. El proceso se lleva a cabo en una unidad semi batch y se evalúa el efecto que tiene el pH en la remoción de estos compuestos orgánicos volátiles.

Parte experimental

Reactivos

Se utilizaron los reactivos fenol, tolueno y 2-propanol como compuestos COV y además, se utilizaron otros reactivos para las diferentes técnicas de análisis.

Equipos

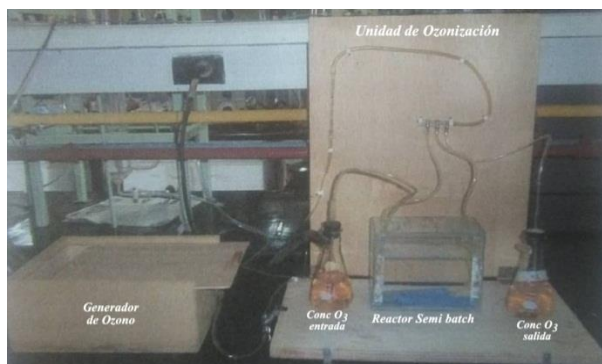
Unidad de Oxidación con ozono

Tratamiento con ozono de aguas contaminadas con compuestos orgánicos volátiles

En la Figura 1 se muestra la unidad de Ozonización, el cual consta de una cuba de vidrio hermética de capacidad para 2000 mL con dos alimentaciones y dos salidas, una para retirar la muestra de agua ozonizada y la otra para determinar la concentración de ozono a la salida.

Las alimentaciones de aire + ozono se hace pasar por unas piedras porosas que permiten el burbujeo y el posterior contacto del agua y el ozono.

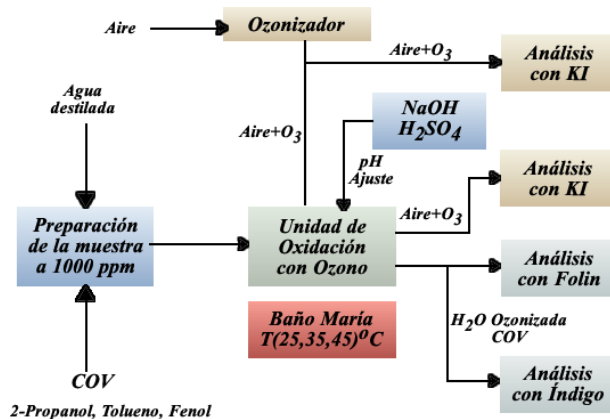
Figura 1. Unidad de Ozonización



Metodología

El procedimiento experimental se llevó a cabo en cuatro etapas: (1) Calibración del ozonizador, (2) preparación del agua con el compuesto orgánico volátil, (3) tratamiento del agua contaminada en la unidad de oxidación y (4) análisis de las muestras. La figura 2 muestra el esquema del procedimiento experimental.

Figura 2. Diagrama del procedimiento experimental



Determinación de la concentración de ozono del generador

Se usa el método yodométrico [27]. Este ensayo consiste en burbujearlo en una solución de KI a la entrada y salida del reactor semibatch. La dosis absorbida de ozono en el agua se calcula por diferencia de concentraciones en el gas de entrada y el de salida según la ecuación:

$$\text{aire} + O_3|_{\text{entrada}} - \text{aire} + O_3|_{\text{salida}} = \text{agua} + O_3|_{\text{absorbida}}$$

y su rendimiento de transferencia es la proporción de dosis absorbida/dosis aplicada, que se representa como un porcentaje según la siguiente ecuación

$$\%R_{\text{ozonización}} = \frac{\text{aire} + O_3|_{\text{entrada}} - \text{aire} + O_3|_{\text{salida}}}{\text{aire} + O_3|_{\text{entrada}}} \times 100$$

Determinación de la concentración de ozono en el agua

Se usó el método colorimétrico de Índigo [27]. El ozono rompe el doble enlace carbono-carbono del reactivo índigo trisulfonato, formando un compuesto incoloro. Se mide la reducción de absorbancia de luz a la onda de 600 nm para calcular la concentración de ozono en agua.

Determinación de la concentración del COV en el agua

Se usó el método colorimétrico de Folín [27]. Este método suele ser adecuado para el análisis del contenido de Fenol para formar un color azul medible a la concentración de interés a la longitud de onda 700 nm.

Variación del pH

Se realizó la variación del pH en las muestras preparadas con los compuestos orgánicos volátiles adicionándole 20 mL de NaOH (1N) para llevar a cabo la reacción en medio básico o 20 mL de H₂SO₄ (1N) para llevar a cabo la reacción en medio ácido. Esto permitió realizar el estudio a distintos valores del pH para una misma solución y determinar así su efecto en la oxidación con ozono en función del tiempo.

Resultados y discusión

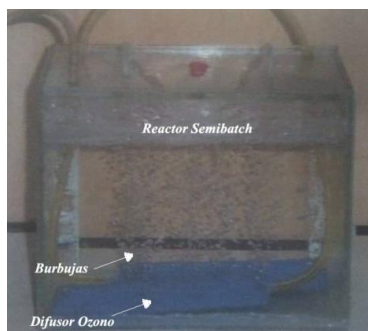
Comportamiento del patrón de flujo del reactor semibatch

En la figura 2 se presenta el comportamiento hidrodinámico del reactor semibatch, se observa una fase gaseosa dispersa en forma de partículas en una fase fluida continua. La fase fluida está representada por el agua a tratar y la fase dispersa es O₃/Aire. Esta unidad representa un sistema multifásico o reactor semi-batch de burbujeo.

Tratamiento con ozono de aguas contaminadas con compuestos orgánicos volátiles

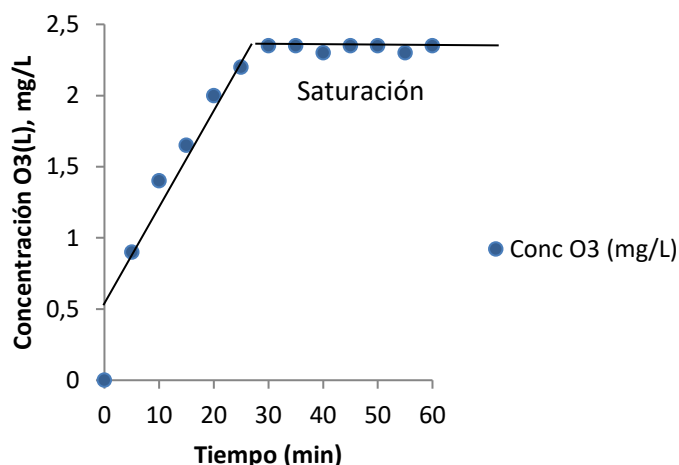
La unidad cuenta con una piedra porosa que simula el distribuidor de la fase gaseosa. El objetivo es generar partículas de tamaño pequeña y uniforme durante la operación de la unidad. Es de observar que el tamaño de burbuja es importante en estos procesos de oxidación con ozono, ya que es un proceso representado o modelado por la transferencia de masa, el cual indica que a un diámetro grande de burbuja disminuye el área de contacto, logrando obtener bajas conversiones.

Figura 2. Comportamiento hidrodinámico del reactor semibatch



Transferencia de masa del ozono desde la fase gas a la fase líquida

El procedimiento para determinar la transferencia de masa del O_3 desde la fase gas hacia la fase líquida, consistió en burbujear O_3 en agua hasta saturación.



Los resultados se muestran en la figura 3 donde se representa la concentración de O_{3L} en función del tiempo. Como puede observarse, al transcurrir un tiempo de 30 min la concentración de O_{3L}

Tratamiento con ozono de aguas contaminadas con compuestos orgánicos volátiles

permanece constante, siendo esta de 2,35 mg/L indicando que la transferencia de masa es efectiva. Esta concentración de O_{3L} en el seno del líquido es la disponible que se tiene para el proceso de oxidación.

Para determinar el coeficiente de transferencia de masa se realizó un balance de materia en la fase líquida de la siguiente forma:

$$\text{Moles de } O_{3(i)} - \text{Moles } O_{3(L)} = \text{Moles de } O_{3(L)\text{acumulada}}$$

$$VK_L a C_{O_3(i)} - VK_L a C_{O_3(L)} = \frac{V dC_{O_3(L)}}{dt}$$

$$K_L a V (C_{O_3(i)} - C_{O_3(L)}) = \frac{V dC_{O_3(L)}}{dt}$$

$$K_L a (C_{O_3(i)} - C_{O_3(L)}) = \frac{dC_{O_3(L)}}{dt}$$

donde $C_{O_3(i)}$ es la concentración de O_3 en la fase gas, mg/L

$C_{O_3(L)}$ es la concentración de O_3 en la fase líquida, mg/L

$K_L a$ es el coeficiente de transferencia de masa, min^{-1}

Para las condiciones iniciales

$$t_0 = 0 \quad C_{O_3(L)o} = 0$$

$$t_f = t \quad C_{O_3(L)f} = C_{O_3(L)}$$

$$\frac{(C_{O_3(i)} - C_{O_3(L)})}{C_{O_3(i)}} = e^{-K_L a t}$$

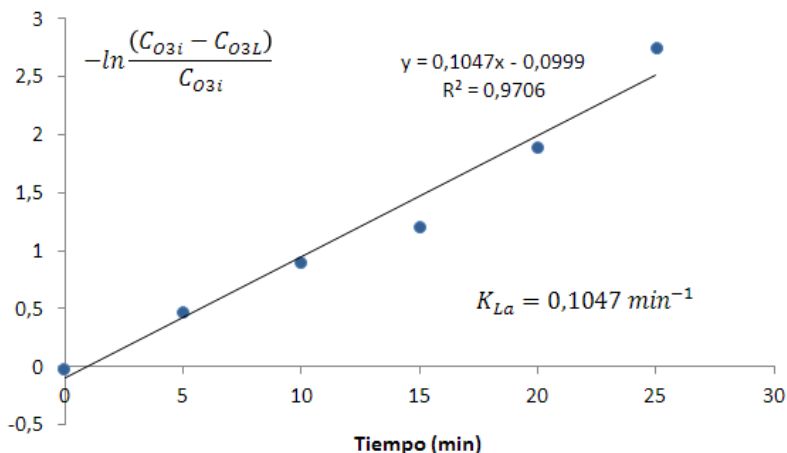
y aplicando logaritmo natural a la ecuación 7 se obtiene:

$$-\ln \left[\frac{(C_{O_3(i)} - C_{O_3(L)})}{C_{O_3(i)}} \right] = K_L a t$$

En la figura 4 se representa el $-\ln \left[\frac{(C_{O_3(i)} - C_{O_3(L)})}{C_{O_3(i)}} \right]$ en función del tiempo, siendo $C_{O_3(i)} = 2,35$ (tomada de la figura 3). La pendiente de dicha gráfica es el coeficiente de transferencia de masa del ozono en el medio acuoso, $K_L a = 0,1047 \text{ min}^{-1}$.

Tratamiento con ozono de aguas contaminadas con compuestos orgánicos volátiles

Figura 4



Efecto del pH

El pH es un parámetro muy importante en el proceso de ozonización, que tiene influencia directa en la reacción del ozono (molecular o radical). De acuerdo con las Figuras 5, 6 y 7, se observó que, para los tres compuestos orgánicos volátiles evaluados, la concentración de ozono en el seno del líquido disminuyó durante el proceso de oxidación. A pH levemente ácido las reacciones de oxidación se ven favorecida, mientras que, a pH básico la oxidación es menor debido a que se promueve tanto la formación de radicales oxidante como también la descomposición de los mismos, lo que lleva a una disminución de la eficiencia de oxidación, según lo explica [21].

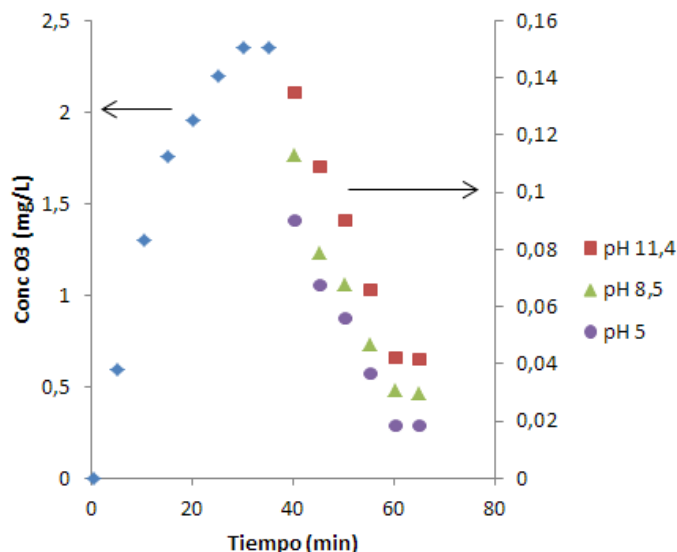
El efecto del pH permitió conocer el grado de oxidación en base al ozono absorbido después de 30 min, representado por el valor de x

$$x = 1 - \left[\frac{O_{3(L)f}}{O_{3(L)0}} \right]$$

En la figura 5 se muestra la concentración de O₃ en función del tiempo para una muestra contaminada con 2-propanol a diferentes pH (pH= 11,4; 8,5; 5). Como puede observarse la mayor oxidación sucede a pH=5 y el tiempo de reacción del compuesto es de 20 min a partir del cual la concentración permanece constante. El grado de oxidación fue x=0,9920.

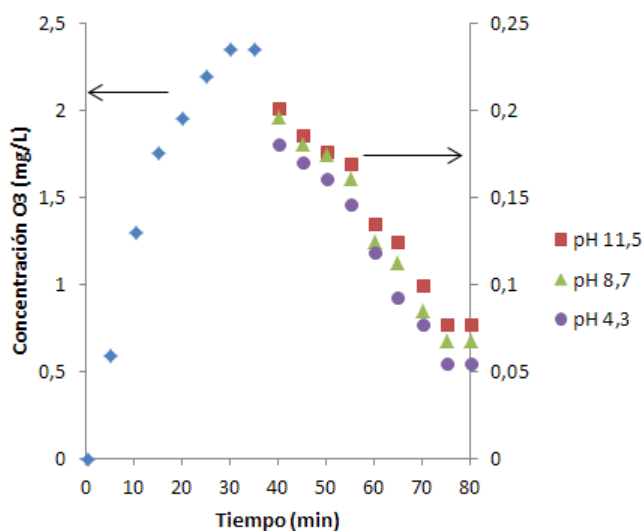
Tratamiento con ozono de aguas contaminadas con compuestos orgánicos volátiles

Figura 5. Grado de conversión del 2-propanol para diferentes valores pH en función del tiempo.



En la figura 6 se muestra la concentración de O_3 en función del tiempo para diferentes pH (pH= 11,5; 8,7; 4,3) en una solución contaminada con tolueno. Como puede observarse la mayor oxidación sucede a pH=4,3 en un tiempo de reacción de 35 min a partir del cual la concentración permanece constante. Esto es debido a que la concentración de $O_{3(g)}$ se absorbe más en la muestra contaminada con tolueno en medio ácido, por lo cual se dispone de mayor concentración de $O_{3(L)}$ para la oxidación. El grado de oxidación es $x=0,9765$.

Figura 6. Grado de conversión del tolueno para diferentes valores pH en función del tiempo

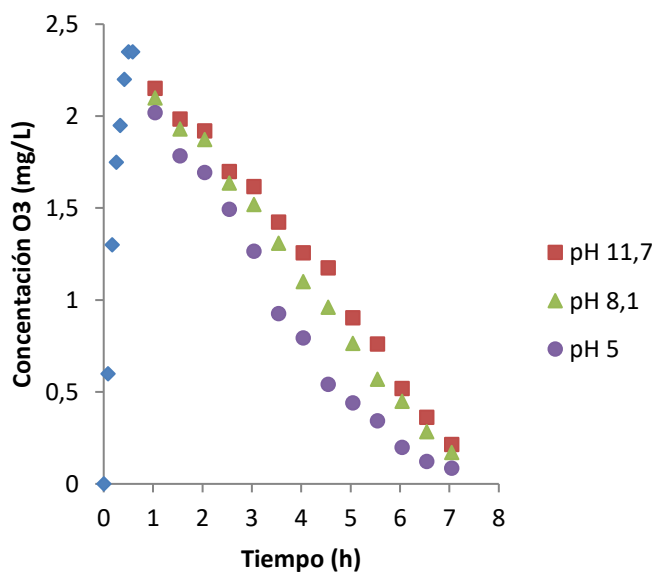


Tratamiento con ozono de aguas contaminadas con compuestos orgánicos volátiles

En la figura 7 se muestra la concentración de O₃ en función del tiempo para una muestra contaminada con fenol para diferentes pH (pH= 11,7; 8,1; 5). Experimentalmente se observó en las mismas un cambio de color durante la oxidación de transparente a amarillo verdoso, lo que dificultó los respectivos análisis de las muestras, procediéndose antes de la misma a una filtración. El color obtenido se debió a que en la reacción de fenol con ozono se producen compuestos como catecol, ácido mucónico, glioxal, ácido glioxílico, ácido fórmico y dióxido de carbono, según estudios realizados [26].

Observando detalladamente la figura 7, a pH=5 sucede la mejor oxidación. El grado de oxidación en base al ozono absorbido después de transcurrido un tiempo de 7 h fue $x=0,9635$.

Figura 7. Grado de conversión del fenol para diferentes valores pH en función del tiempo



Conclusiones

El proceso semibatch de oxidación por ozono representa un vía para el tratamiento de compuestos orgánicos volátiles (VOCs). La unidad presento una distribución de burbuja heterogénea. El coeficiente de la transferencia de masa del ozono al medio acuoso fue de $k_{La}=0,1047 \text{ min}^{-1}$.

El grado de oxidación para el 2-propanol fue del 99% con un pH=5 y un tiempo de reacción de 20 min.

Tratamiento con ozono de aguas contaminadas con compuestos orgánicos volátiles

El grado de oxidación para el tolueno fue del 97,65% con un pH=4,3 y un tiempo de reacción de 35 min.

El grado de oxidación para el fenol fue del 96,35% con un pH=5 y un tiempo de reacción de 7 h.

A pH moderadamente ácido los compuestos orgánicos tratados fueron removidos del agua en el orden siguiente: 2-propanol > tolueno > fenol.

Referencias

1. Shelton JL; Burow KB; Dubrovsky NM; Land M; Gronberg JM. Low-level volatile organic compounds in active public supply wells as ground-water tracers in the Los Angeles physiographic basin, California, 2000.
2. Atasay E; Dögeroglu T; Kara S. The estimation of NMVOC emissions from an urban-scale wastewater treatment plant. *Water Res.* 2004, 38, 3265-3274.
3. Xu J; Szyszkowicz M; Jovic B; Austin C; Zhu J. Estimation of indoor and outdoor ratios of selected volatile organic compounds in Canada. *Atmos. Environ.* 2016, 141, 523-531.
4. Berenjjan A; Chan N; Jafarizadeh H. Volatile organic compounds removal methods: A Review. *American Journal of Biochemistry and Biotechnology*, 2012, 8(4), 220-229.
5. EPA, 2012. Volatile Organic Compounds (VOCs).
6. Berenjjan, A. and A. Khodiev, 2009. How ozone can affect volatile organic compounds. *Australian J. Basic Applied Sci.*, 3: 385-388.
7. Zhang Y; Zhang T; Yan B; Wei C. Distribution characteristics of volatile organic compounds and contribution to ozone formation in coking wastewater treatment plant. *Int. J. Environ. Res. And Public Health.* 2020, 17, 583-596.
8. Wei, X.X.; Zhang, Z.Y.; Fan, Q.L.; Yuan, X.Y.; Guo, D.S. The effect of treatment stages on the coking wastewater hazardous compounds and their toxicity. *J. Hazard Mater.* 2012, 2012, 135-141.
9. Bartalis I; Siminiceanu I; Arany E. Enhanced ozonation of phenol in water. *Rev. Chim. (Bucharest)*, 62, No. 11, 2011.
10. Busca G; Bereardinelli S; Resini C; Arrighi I. Technologies for removal of phenol from fluid streams: a short review of recent developments. *Journal of Hazardous Materials*, 160, 2008, p. 265.

Tratamiento con ozono de aguas contaminadas con compuestos orgánicos volátiles

11. Moctezuma E; Gonzalez R. Photocatalytic degradation of phenol and 4-chlorophenol with ozone. *Rev. Intern. Contam. Amb.* 19, 2003, p. 115.
12. Yang, W.B.; Chen, W.H.; Yuan, C.S.; Yang, J.C.; Zhao, Q.L. Comparative assessments of VOC emission rates and associated health risks from wastewater treatment processes. *J. Environ. Monit.* 2012, 14, 2464–2474
13. Phanprasit W; Songpek K; Boonyayothin V; Sujirarat D. Inhalation and dermal exposure to toluene among printing workers in a plastic bag factory. *Journal of Health Res.* Vol. 33 No. 1, 2019 , 68-79
14. Mekhdiiev E; Litvinyuk I; Burenina I; Spasskaya N; Pirverdieva E. Economic assessment of international and European experience in oil refining and petrochemical industries integration. *Rev. Espacios.* Vol 39, No 50, 2018.
15. Bahram Ghasemi, Bagher Anvaripour, Sahand Jorfi, Neematollah Jaafarzadeh. Enhanced Photocatalytic Degradation and Mineralization of Furfural Using UVC/TiO₂/GAC Composite in Aqueous Solution, *International Journal of Photoenergy*, vol. 2016, 10 pages, 2016.
16. Loera-Valenzuela P; Pérez-Flores S; López C. Biodegradación de compuestos aromáticos. *Rev. Iberoamericana de Ciencias*, 2016, Vol. 3, No 7 39-51.
17. Wang, N. et al. (2016). A review on Fenton-like processes for organic wastewater treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering.* Elsevier B.V., vol. 4(1), pp. 762-787
18. Patiño K; Arroyave S; Marín J. Oxidación electroquímica y ozonización aplicadas al tratamiento de aguas de lavado de la producción de biodiesel. *Inf. Tecnol.* 2012, Vol. 23 no. 2 .41-52
19. Rezaei E; Soltan J; Chen N. Catalytic oxidation of toluene by ozone over alumina supported manganese oxides: Effect of catalyst loading. *Applied Catalysis B: Environmental.* 2013, Vol. 136-137, 5, 239-247
20. Reisz E; Tekle-Röttering A; Naumov S; Schmidt W. Reaction of 1-propanol with Ozone in Aqueous media. *Int. J. Molecular Sciences.* 2019, 20, 4-24
21. Reisz E; Tekle-Röttering A; Naumov S; Schmidt W. Reaction of 2-propanol with Ozone in Aqueous media. *Water Research.* 2017, 4, 30-45
22. Singh S; Fan M; Brown R. Ozone treatment of process water from a dry-mill ethanol plant. *Bioresource Technology.* 2008, 99, 1801-1805

Tratamiento con ozono de aguas contaminadas con compuestos orgánicos volátiles

23. Rodríguez A; Rosal R; Perdigón-Melón J; Mezcu M y col. Ozone-based technologies in water and wastewater treatment. Hdb Env. Chem. 2008, Vol 5, 127-175
24. Beltrán F; Encinar J; García-Araya J; Alonso M. Kinetic study of the ozonation of some industrial wastewaters. Science & Engineering: The Journal of the International Ozone Association, 2008, 14:4,303-327
25. Merenyi, G., Lind, J., Naumov, S., Sonntag, C., 2009. The reaction of ozone with the hydroxide ion: mechanistic considerations based on thermokinetic and quantum chemical calculations and the role of HO₄⁻ in superoxide dismutation. Chemistry 16, 1372–1377
26. Beltrán FJ. 2004. Ozone Reaction Kinetics for Water and Wastewater Systems. Lewis Publishers, New York, NY, USA. p.358-410.
27. Díaz de Santos. Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. APHA-AWWA-WPCF 4-57 – 4-187