

# **Evaluación de un sistema UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> para mitigar los impactos de la agroindustria en Sinaloa, con enfoque de conversión-recuperación de nutrientes**

## **Assessment of a UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> system to mitigate agribusiness impacts in Sinaloa, with a focus on nutrient conversion-recovery**

**Ortiz-Marin Alejandro David<sup>1,\*</sup>, Ramírez Medina Hilda Karina<sup>1</sup>, Reyes-Prado Manuel Antonio<sup>1</sup>, Cristerna Sosa Sait Omar<sup>1</sup>, Amabilis-Sosa Leonel E.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Tecnológico Nacional de México-ITCuliacán, Juan de Dios Bátiz S/N, Culiacán, Sinaloa, 80220, México.

<sup>2</sup>CONACyT-Tecnológico Nacional de México-ITCuliacán, Juan de Dios Batiz, Col. Guadalupe, Culiacán, Sinaloa, 80220, México.

\*Autor de correspondencia: ing.alexom23@gmail.com

**Palabras claves:** Agua residual agrícola, Agua residual ganadera, recuperación de nutrientes, sistemas de tratamiento de aguas residuales.

**Keywords:** Agricultural wastewater, livestock wastewater, nutrient recovery, wastewater treatment systems.

### **Resumen**

La agricultura intensiva conlleva a un uso exacerbado de plaguicidas, generando así grandes volúmenes de aguas residuales agrícolas (ARA) no tratadas. En este trabajo se evaluó un proceso de oxidación avanzada para la eliminación eficiente de compuestos recalcitrantes y recuperación de nutrientes como lo son el nitrógeno y fósforo. Los procesos de oxidación avanzada han demostrado ser eficientes para el tratamiento de aguas residuales farmacéuticas, textiles y municipales que contienen alta carga orgánica y de nutrientes industriales, además de alta toxicidad. Además, los compuestos presentes en dichas aguas son transformados en moléculas oxidadas que pueden ser asequibles para los sistemas biológicos. Se implementó un sistema UV/ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en el que se evaluaron los tiempos de retención hidráulica (TRH) 60, 90 y 120 minutos donde se obtuvieron eficiencias de remoción de materia orgánica cuantificada en DQO arriba del 90% usando concentraciones de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> de 48.94, 65.25 y 81.58 mM respectivamente. Por otra parte, la conversión de nitrógeno orgánico a nitratos (N-NO<sub>3</sub>) conforme a su concentración inicial. Los resultados obtenidos para un TRH de 60 minutos y una concentración de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> de 48.94 mM fueron concentración de 200% mayor a la concentración inicial de N-NO<sub>3</sub> y concentraciones de fósforo inorgánico (P-PO<sub>4</sub>) 130% mayores que las iniciales, las cuales provienen del fósforo orgánico atribuido a los plaguicidas organofosforados. Finalmente, el presente proyecto plantea el tratamiento adecuado de aguas residuales agropecuarias con alto contenido de materia orgánica, nitrógeno, fósforo y contaminantes mediante un proceso de oxidación avanzada (POA) UV/ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> para poder reutilizar el agua con concentraciones adecuadas de nutrientes en forma inocua en los campos agrícolas y así disminuir el consumo de fertilizantes.

### **Abstract**

Intensive agriculture leads to an exacerbated use of pesticides, thus generating large volumes of untreated agricultural wastewater (AWW). In this work, an advanced oxidation process (AOP) was evaluated for the efficient elimination of recalcitrant compounds and recovery of nutrients such as nitrogen and phosphorus. The AOP have demonstrated to be efficient for the treatment of pharmaceutical, textile and municipal wastewater containing high organic and industrial nutrient loads, as well as high toxicity. In addition, the compounds present in such waters are transformed into oxidized molecules that can be made available to biological systems. It was implemented a UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> system in which were evaluated the hydraulic retention times (HRT) 60, 90 and 120 minutes where were obtained organic matter removal efficiencies quantified in COD above 90% using H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> concentrations of 48.94, 65.25 and 81.58 mM respectively. On the other hand, the conversion of organic nitrogen to nitrates (N-NO<sub>3</sub>) according to its initial concentration. The results obtained for a 60-minute HRT and an H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> concentration of 48.94 mM were 200% higher than the initial N-NO<sub>3</sub> concentration and 130% higher than the initial inorganic phosphorus (P-PO<sub>4</sub>) concentrations, which come from the organic phosphorus attributed to organophosphate pesticides. Finally, the present project proposes the adequate treatment of agricultural waste water with a high content of organic matter, nitrogen, phosphorus and emerging pollutants through an AOP UV/ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> in order to reuse water with adequate concentrations of nutrients in a safe way in agricultural fields and thus reduce the consumption of fertilizers.

## 1. Introducción

En los últimos años, los ríos y mares se han visto afectados debido al gran aumento de actividades antropogénicas que generan nuevos contaminantes con estructuras persistentes y difícilmente biodegradables denominados contaminantes emergentes (CE) (Daughton, 2004; Geissen et al., 2015; Rodríguez-Narvaez, Peralta-Hernandez, Goonetilleke, & Bandala, 2017). Los CE se caracterizan por su baja biodegradabilidad y grandes concentraciones de nutrientes, pero en una estructura recalcitrante, tal y como lo es el caso del albendazol, tiabendazol, levamisol, fenbendazol y oxfendazol, son algunos de los fármacos más utilizados para desparasitar ganado. En paralelo, en la agricultura se usan plaguicidas organofosforados y aún quedan residuos de los organoclorados. Entre los más representativos se encuentran el azinfos metil, clorpirifos, diclorvos, dimetoato, disulfoton y malatión para organofosforados y el dicloro difenil etano (DDE), endosulfán, endrín para organoclorados (Alberto, Baena, José, & Pérez, 2012; Bejarano González et al., 2017; Leal Soto et al., 2014; Ljubas et al., 2016; Urtiaga, Pérez, Ibáñez, & Ortiz, 2013).

En particular para Sinaloa, se práctica la agricultura más tecnificada y moderna del país. Su alta productividad le permite participar en los mercados internacionales como exportador de productos hortofrutícolas, lo que representan más del 65% de las exportaciones totales que realiza el estado, además de contribuir en el abasto de alimentos para la demanda nacional (Peinado-Guevara, Peinado Guevara, Campista Leon, & Delgado Rodríguez, 2015). Por todo esto, las necesidades hídricas del estado son elevadas.

A consecuencia, uno de los principales problemas en cuencas hidrográficas del noroeste de México y características de los efluentes, es el exceso de nitrógeno, fósforo y otro residuos agroquímicos que reciben de las descargas de aguas de sistemas de drenaje

agrícola y plaguicidas (Alberto et al., 2012; Galindo-Reyes & Alegria, 2018; González-Márquez, A., M.I., & H.B., 2018).

Por otra parte, la actividad ganadera también es ampliamente desarrollada en Sinaloa, generando grandes cantidades con residuos contaminantes al medio ambiente.

En cuanto al tratamiento de los CE, los sistemas biológicos (secundarios) no están diseñados para su tratamiento y pueden colapsar o, en el mejor de los casos, tener remoción nula. Las alternativas actuales se basan en la ultrafiltración, adsorción y oxidación química, pero representan altos costos operaciones y/o económicos. Además, no cuentan con parámetros de diseño para su implementación a escala real y los efluentes tratados no cumplen con los lineamientos de las normativas ambientales. Los procesos de Oxidación Avanzada (POAs) pueden ser una alternativa eficiente, ya que se basa en la generación de radicales altamente oxidantes teniendo un potencial de oxidación elevado ( $E= 2.4 \text{ V}$ ). No obstante, la estructura molecular de los contaminantes emergentes indica que, al oxidarse, pueden generarse metabolitos secundarios con características tóxicas y en el caso de la oxidación completa, aún estarán presentes los otros elementos inorgánicos como nitrógeno y fósforo que podrían ser recuperados para ser reutilizados. Esto se maximiza aún más en la realidad, porque el agua residual contiene altas concentraciones de diversos sólidos disueltos tanto volátiles como fijos, que también serán objeto de la oxidación. En este sentido, el acoplamiento del sistema de oxidación avanzada con un tratamiento biológico (seleccionado en función del efluente del POAs) resulta una potencial alternativa para el tratamiento de efluentes agropecuarios con presencia de compuestos emergentes, alta carga orgánica, nutrientes y su posible reutilización en la agricultura. En este sentido, el principal objetivo de la presente investigación es evaluar un sistema de oxidación avanzada para la recuperación de nutrientes en fase acuosa y con enfoque agrícola, durante el tratamiento de efluentes agropecuarios con presencia de compuestos emergentes y alta carga orgánica.

## **2. METODOLOGÍA**

### ***2.1. Toma de muestra de los efluentes agropecuarios***

Las muestras se tomaron de los efluentes de los canales que transportan sangre mezcladas con residuos de la misma actividad ganadera y para la agricultura se obtuvieron las muestras de los drenes agrícolas. La toma de muestras se realizó justo antes de ingresar a las lagunas de oxidación (ganadería). Tanto la recolección, preservación y análisis de la muestra se realizó con la metodología establecida en la NOM-001-SEMARNAT-1996.

### ***2.2. Determinaciones analíticas***

La demanda química de oxígeno (DQO) se realizó por el procedimiento del Method 410 (USEPA, 1993) que corresponde a reflujo cerrado y se basa en la oxidación de la materia orgánica por dicromato de potasio en medio ácido. El nitrógeno total Kjeldahl (NTK) se midió por el procedimiento descrito en la norma NMX-AA-026-SCFI-2010 que se divide en digestión, ebullición y condensación de las diferentes formas de nitrógeno. La determinación de nitrógeno amoniacal se cuantificó mediante la técnica de fenol y heptamolibdato de amonio descrita en APHA (2003), mientras que la de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) se realizó de acuerdo con la norma (NMX-AA-079-SCFI-2001) bajo el principio de sulfato de brucina, mientras que los sulfatos fueron cuantificados de acuerdo con la norma NMX-AA-074-SCFI-2014

(2014), basada en la precipitación del ion sulfato con cloruro de bario y los parámetros pH y potencial de óxido reducción (ORP) fueron determinados por método potenciométrico usando un equipo LabGenius 7200.

Por su parte, la determinación de carbono orgánico total (COT) por medio de un equipo modelo serie TOC-L donde el COT es oxidado a CO<sub>2</sub> en la reacción de combustión catalítica. Todas estas determinaciones fueron realizadas en cada una de las etapas del tren de tratamiento propuesto (fisicoquímico-biológico).

Las concentraciones de plaguicidas se midieron con una cromatografía de gases Agilent 7890A equipada bajo flujo continuo con una columna capilar de cromatografía de gases HP-5 y un detector fotométrico de llama. La concentración de plaguicidas en los gases de nitrógeno se midió con una cromatografía de gases Agilent 7890A equipada como portadora y parámetros de operación como una temperatura de 300 °C durante la cromatografía con una columna de cromatografía de gases capilar HP-5 y un detector fotométrico de llama. El ciclo de gas nitrógeno, un tiempo de purga de 0.75 min y los volúmenes de inyección de 4 µL fueron de acuerdo con (Cedillo-Herrera et al., 2020).

### ***2.3. Parámetros de diseño y operación del sistema de oxidación avanzada***

Para el pretratamiento de los residuos agropecuarios se evaluó la oxidación UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> con base en la literatura y previos trabajos del grupo de investigación y el análisis teórico realizado (Chen, 1997; Oller, Malato, & Sánchez-Pérez, 2011; Ortiz-Marin et al., 2020; Pineda Arellano, González, Martínez, Salgado-Tránsito, & Franco, 2013; Rodríguez-Narvaez et al., 2017; Sarria et al., 2002). Para ello se utilizaron cámaras de irradiación de acero inoxidable con volumen de 0.3 L y lámparas UV de vapor de mercurio protegidas con cuarzo. El flujo del agua tanto para el sistema continuo como para la mezcla del agua con los catalizadores se realizó por medio de bombas peristálticas de 12 V genéricas.

Para encontrar la dosis y temporalidad óptima de la adición de los diferentes tipos de oxidantes se realizarán pruebas con diferentes relaciones de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/DQO con relación baja, media y alta. Se realizó la cuantificación del H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> residual por medio de la técnica de permanganato de potasio (Ortiz et al., 2019).

### ***2.4. Análisis estadístico***

Se realizó la prueba de normalidad Kolmogorov-Smirnov y Anderson-Darling a todos los resultados para verificarla homogeneidad y homocedasticidad de los datos y así establecer el tipo de análisis en cuanto a la parametrización. Para aquellos resultados en los que las variables de respuesta resultaron no paramétricos, se realizó una transformación Box-Cox para el ajuste de los resultados dentro de los límites inferior y superior.

Posteriormente, se procedió a un análisis factorial basado en análisis de varianza con interacciones. Para todos los datos obtenidos y los análisis anteriormente mencionados se utilizó el software Statgraphics Centurion XVI.

## **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### ***3.1. Caracterización de agua residual agrícola***

En la Tabla 1 se muestran los resultados de la caracterización del Agua Residual Agrícola (ARA). En dicha tabla donde se observa un promedio de 1051.21 mg L<sup>-1</sup> para la

DQO, con un máximo de 1566.67 mg L<sup>-1</sup> en la época de primavera-verano y un valor de 550 mg L<sup>-1</sup> en la época de otoño-invierno. En los tres casos el valor se encuentra por arriba del LMP establecido en el PROY-NOM-001-SEMARNAT-2017, así como lo establecido por Agencia de Protección Ambiental (EPA, 2012) y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2002) . Un agua residual municipal tiene una DQO promedio de 150 mg L<sup>-1</sup>. Las altas concentraciones de DQO se asocian a la presencia de agroquímicos, en especial plaguicidas y amoníaco, además de residuos de cultivos durante cosechas. En efecto, se ha descrito que bajas concentraciones de plaguicidas exhiben altas concentraciones de DQO (la presencia de 330.35 g mol<sup>-1</sup> es igual a 783.51 mg L<sup>-1</sup> de DQO, 291.26 g mol<sup>-1</sup> de paratión dan una DQO igual a 671.96 mg L<sup>-1</sup>) (Rodríguez-Mata et al., 2019), lo cual es un indicador de la alta concentración de materia orgánica disuelta de tipo recalcitrante en la zona y que finalmente impactará al ecosistema.

**Tabla 1.** Caracterización del ARA obtenida en el módulo de riego II-3, de las temporadas otoño-invierno 2019 y primavera-verano 2020.

Parámetro	Promedio	Mínimos	Máximos	Desv. Est.
pH	7.91	7.71	8.18	0.20
pOR (mV)	133.11	67.00	184	43.72
SDT (mg L <sup>-1</sup> )	1080.67	1040	1138	35.54
SST (mg L <sup>-1</sup> )	155.55	103	204	39.41
N-NO <sub>3</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	1.51	0.40	2.26	0.69
N-NH <sub>3</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	0.85	0.47	1.05	0.21
P-PO <sub>4</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	0.73	0.19	1.32	0.21
PT (mg L <sup>-1</sup> )	1.15	0.95	1.29	0.13
DQO (mg L <sup>-1</sup> )	1051.21	550	1566.67	381.91

Por otra parte, se detectaron diferentes plaguicidas con características nitrogenados y/o fosfatados, como se mencionó previamente, los valores de DQO son en gran medida a las concentraciones de plaguicidas, que aunque sean mínimas estas concentraciones se ven reflejadas directamente en la demanda de oxígeno por materia orgánica e inorgánica del agua residual analizada. Así, la tabla 2 indica los plaguicidas que fueron cuantificados con las características antes mencionadas. La gran mayoría de estos plaguicidas están prohibidos usarlos en Estados Unidos y en la Unión Europea debido a su gran efecto negativo que tienen hacia el medio ambiente y acuático.

**Tabla 2.** Plaguicidas cuantificados en el agua residual agrícola de la cuenca del río Culiacán.

Plaguicida detectados	Límite de detección del método (µg L <sup>-1</sup> )	Concentración (µg L <sup>-1</sup> )
Diazinon	0.01	0.034
Clorpirifos	0.001	0.03

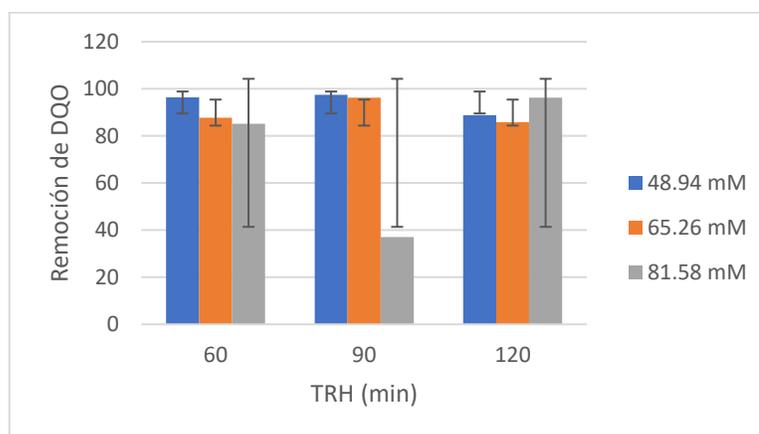
Dieldrin	0.004	0.019
Endosulfan	0.002	0.019
Endosulfan beta	0.002	0.021
Endosulfan sulfato	0.002	0.024
Lindano	0.006	0.009

Finalmente, se observa que la concentración de los nutrientes en el ARA se presenta por debajo del rango establecido por el PROY-NOM-001-SEMARNAT-2017(DOF, 2018). No obstante, es importante destacar que autores como Dupas et al., (2015); Roé-Sosa et al., (2019) y Smith et al. (2015) indican que aproximadamente un 47% y 49% de estas concentraciones se debe a las formas de nitrógeno y fósforo contenidas en la molécula de los plaguicidas que son tóxicos a niveles traza. En efecto, entre los principales plaguicidas aplicados en la zona se encuentran endosulfán, clorpirifos, malatión, cipermetrina y dimetoato, entre otros que son organofosforados, piretroides y carbamatos caracterizados por su estructura fosfatada y nitrogenada respectivamente (Leyva Morales, 2014).

### ***3.2.Optimización del sistema de tratamiento UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> para la recuperación de nutrientes***

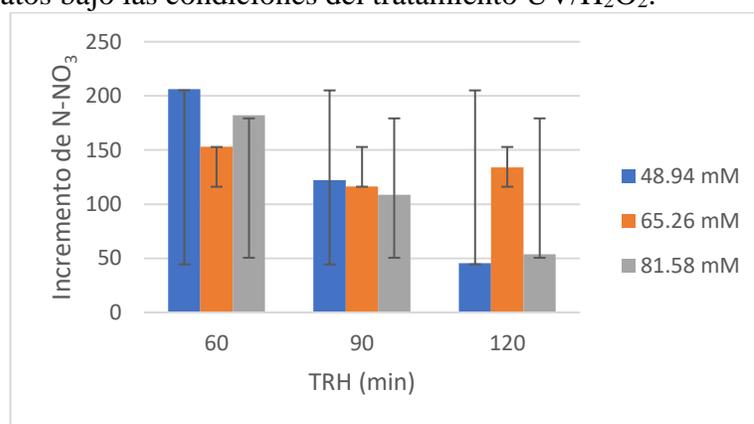
A través del diseño central compuesto (DCC) se obtuvieron 27 corridas experimentales, características de un diseño factorial 3<sup>2</sup>. Los resultados indican que mediante un sistema UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> fue posible obtener altas eficiencias de remoción en DQO de manera conjunta, a un considerable incremento de nutrientes, hasta el triple de la concentración de entrada de N-NO<sub>3</sub> y hasta el doble de la concentración inicial de P-PO<sub>4</sub>. En conjunto, estos resultados sugieren que es posible recuperar nutrientes en el efluente del sistema UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

Se realizaron pruebas con ARA para el sistema UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y se obtuvieron eficiencias arriba del 90% en un tiempo de 60 min, por lo que estos resultados permiten considerar la factibilidad técnica del tratamiento para su aplicabilidad en ARA y la eficiente remoción de plaguicidas. En la figura 1 se muestran los resultados obtenidos a diferentes tiempos de irradiación, diferentes concentraciones del agente oxidante y el porcentaje de remoción de la DQO obteniendo remociones hasta el 99% indicando la mineralización de casi en su totalidad de la materia orgánica presente en el ARA.



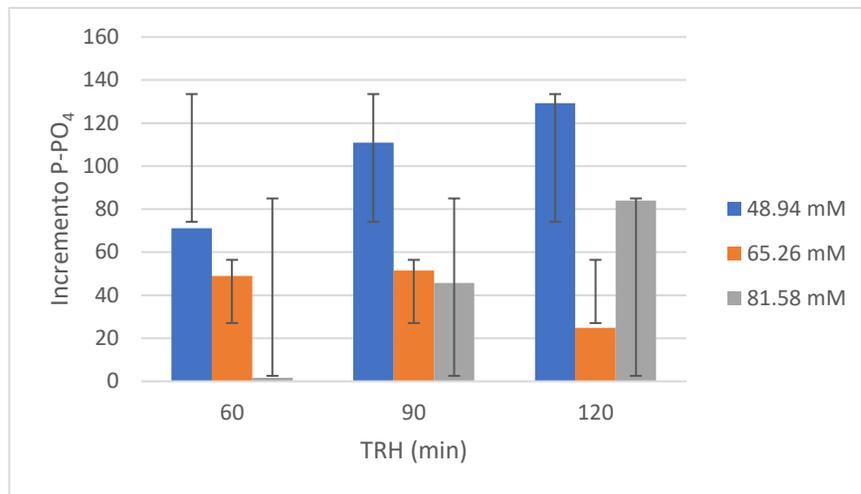
**Figura 1.** Valores promedio de remoción de DQO en función de TRH.

En cuanto a la generación de nitratos, la Figura 2 describe su incremento en función del tiempo de irradiación UV y de la dosis de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Al variar los niveles del factor dosis de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, solamente con 90 min no existieron diferencias entre los tratamientos al variar dicha dosis de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (P>0.05) alcanzando un incremento entre el 105 y 112%. En efecto, se puede observar que, al aplicar 60 min de irradiación, el incremento de nitratos fue del 200% cuando se utilizó la menor dosis de agente oxidante (48.94 mM), lo cual resultó significativamente mayor que con las otras dosis (153% para dosis de 65.25 mM y 183% para dosis de 81.58 mM). Cabe mencionar que, en todos los casos de la dosificación, los mayores incrementos de nitratos se obtuvieron al utilizar 60 min de irradiación UV, por lo que la Figura 2 presenta cierta tendencia a descender conforme dicho el tiempo de irradiación era mayor. Al respecto Ortiz-Marin et al. (2020) demostraron que el nitrógeno orgánico de compuestos persistentes es convertido a nitratos bajo las condiciones del tratamiento UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.



**Figura 2.** Valores promedio de incremento de N-NO<sub>3</sub> en función de TRH.

En lo que respecta al incremento de P-PO<sub>4</sub>, se obtuvieron eficiencias desde un 70% para 60 min y hasta 130% con 120 min de TRH. En cuanto a la dosis de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> se presentaron mayores incrementos de P-PO<sub>4</sub> con dosis de 48.94 mM con eficiencias hasta de un 130%. En contraste, los niveles de 65.26 mM y 81.58 mM alcanzaron eficiencias máximas de 50% y 45% respectivamente. También, en la Figura 3 se observa que el aumento en la dosificación de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> conlleva a una disminución en el incremento de P-PO<sub>4</sub>. Es decir, son inversamente proporcionales. Aunado a lo anterior, Sindelar et al. (2016) obtuvieron la formación de fósforo orgánico a fosfatos en muestras de aguas de tipo pluvial empleando el sistema UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> el cual permitió eficiencias alrededor de un 100%, dicha eficiencia se obtuvo bajo los parámetros de operación de 60 min y una dosis de 1.47 mM de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> la cual es una dosis menor a las utilizadas en el presente trabajo.



**Figura 3.** Valores promedio de incremento de P-PO<sub>4</sub> en función de TRH.

Además, estos hallazgos sugieren que el sistema implementado también podrá recuperar fósforo y, especialmente, nitrógeno en sus formas oxidadas durante el tratamiento de las aguas ganaderas, ya que estas se caracterizan por el alto contenido de nitrógeno característico de la sangre y residuos fisiológicos como de las moléculas de los compuestos utilizados para la desparasitación del ganado ya que estos compuestos no son absorbidos por los animales al 100% y llegan a permanecer en los cuerpos de agua a su llegada al mar o algún cuerpo receptor dañando el sistema acuático.

#### 4. CONCLUSIONES

Con base en la caracterización del agua residual agrícola inicial y durante los tratamientos a diferentes TRH y dosis de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, es posible concluir que en la primera etapa de este proyecto se encontraron remociones considerables de DQO, conversión de nutrientes para utilizarlos posteriormente en forma inocua en conjunto con el ARA tratada.

Utilizando los resultados de optimización del sistema UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, se obtienen las condiciones de operación óptimas donde una dosis de 48.94 mM de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y un TRH de 60 minutos permite alcanzar una remoción de materia orgánica hasta del 99% en términos de DQO, en conjunto con el incremento de nutrientes de hasta un 200% para el caso de nitratos y del 100% para fosfatos, lo cual resulta en una alta factibilidad técnica del POA para la remoción de contaminantes presentes en ARA, principalmente plaguicidas, por lo que se concluye que es posible obtener altos porcentajes de mineralización de contaminantes con contenido de nitrógeno y fósforo de manera simultánea a la formación y obtención de nutrientes a través del proceso de oxidación por la presencia de los radicales •OH.

El análisis de resultados en conjunto con los reportados en la literatura, sugieren que el sistema de tratamiento implementado y operado con las condiciones óptimas establecidas bajo el diseño experimental es una alternativa promisoriosa para el tratamiento eficiente de aguas residuales agropecuarias con potencial reúso en el mismo sector económico, debido a las altas eficiencias de remoción de materia orgánica y alto contenido de nutrientes en forma asimilable para los cultivos. Ante esto, se está trabajando en la segunda etapa del proyecto que es la caracterización y desarrollo del mismo proceso para aguas residuales de la industria ganadera para que ampliamente se pueda continuar la investigación a escala piloto y realizar

el estudio de factibilidad económica. Así mismo, obtener un amplio set de datos en los que se cuantifique la toxicidad.

## Bibliografía

- Alberto, J., Baena, P., José, F., & Pérez, M. (2012). Persistencia De Plaguicidas En El Ambiente Y Su Ecotoxicidad Una Revisión De Los Procesos De Degradación Natural. *Gestión y Ambiente*, 15(3), 27–38.
- Bejarano González, F., Aguilera Márquez, D., Álvarez Solís, J. D., Arámbula Meraz, E., Arellano Aguilar, O., Bastidas Bastidas, P. de J., ... Bernardino Hernández, H. U. (2017). Los Plaguicidas Altamente Peligrosos en México. *Red de Acción Sobre Plaguicidas y Alternativas En México, A.C. (RAPAM)*, 351. <https://doi.org/10.1097/NNA.0b013e31828958cd>
- Cedillo-Herrera, C. I. G., Roé-Sosa, A., Pat-Espadas, A. M., Ramírez, K., Rochín-Medina, J., & Amabilis-Sosa, L. E. (2020). Efficient malathion removal in constructed wetlands coupled to UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> pretreatment. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(15). <https://doi.org/10.3390/APP10155306>
- Chen, J. (1997). *Advanced oxidation technologies: Photocatalytic treatment of wastewater*. Retrieved from <http://library.wur.nl/WebQuery/clc/944257>
- Daughton, C. G. (2004). *Non-regulated water contaminants : emerging research*. 24, 711–732. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2004.06.003>
- DOF. (2018). *NOM-001-SEMARNAT-2017, Proyecto de Norma Oficial Mexicana*. México.
- Dupas, R., Delmas, M., Dorioz, J. M., Garnier, J., Moatar, F., & Gascuel-Odoux, C. (2015). Assessing the impact of agricultural pressures on N and P loads and eutrophication risk. *Ecological Indicators*, 48, 396–407. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.08.007>
- EPA. (2012). *2012 Guidelines for Water Reuse*.
- FAO. (2002). *1. Wastewater characteristics and effluent quality parameters* (Vol. 100, pp. 1–15). Vol. 100, pp. 1–15.
- Galindo-Reyes, J. G., & Alegria, H. (2018). Toxic effects of exposure to pesticides in farm workers in Navolato, Sinaloa (Mexico). *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 34(3), 505–516. <https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.03.12>
- Geissen, V., Mol, H., Klumpp, E., Umlauf, G., Nadal, M., van der Ploeg, M., ... Ritsema, C. J. (2015). Emerging pollutants in the environment: A challenge for water resource management. *International Soil and Water Conservation Research*, 3(1), 57–65. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2015.03.002>
- González-Márquez, L. C., A., T., M.I., H., & H.B., R. (2018). *Fosfatos en agua de drenaje agrícola: cuenca baja del Río Sinaloa*.
- Leal Soto, D. S., Valenzuela Quintanar, A. I., Gutiérrez Coronado, M. de L., Bermúdez Almada, M. del C., Hernández García, J., Aldana Madrid, M. L., ... Valenzuela Navarro, C. P. (2014). Organochlorine Pesticide Residues in Agricultural Soils. *Terra Latinoamericana*, 32(1), 1–11.
- Leyva Morales, J. B. (2014). *EVALUACIÓN DEL RIESGO AMBIENTAL POR PLAGUICIDAS: CARACTERIZACIÓN DEL USO Y MUESTREO EN EL DISTRITO DE RIEGO 010: CULIACÁN HUMAYA*. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C., Mazatlán, Sinaloa.
- Ljubas, D., Čizmić, M., Vrbat, K., Čurković, L., Stipaničev, D., Repec, S., & Babić, S. (2016). UV-based Advanced Oxidation Processes for Albendazole Degradation. *SEM2016, Book of Abstracts*. Retrieved from <https://www.bib.irb.hr/850236>
- NMX-AA-074-SCFI-2014. (2014). ANÁLISIS DE AGUA – MEDICIÓN DEL ION SULFATO EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS – MÉTODO DE PRUEBA. *Diario Oficial de La Federación*, 13.

- Oller, I., Malato, S., & Sánchez-Pérez, J. A. (2011). Combination of Advanced Oxidation Processes and biological treatments for wastewater decontamination-A review. *Science of the Total Environment*, 409(20), 4141–4166. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.08.061>
- Ortiz-Marin, A. D., Amabilis-Sosa, L. E., Bandala, E. R., Guillén-Garcés, R. A., Treviño-Quintanilla, L. G., Roé-Sosa, A., & Moeller-Chávez, G. E. (2020). Using sequentially coupled UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-biologic systems to treat industrial wastewater with high carbon and nitrogen contents. *Process Safety and Environmental Protection*, 137, 192–199. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.02.020>
- Ortiz, A., Moeller, G., & Amabilis, L. (2019). *Estudio de la biodegradación de altas concentraciones de materia orgánica y nitrógeno total presente en aguas residuales industriales a través de un sistema biológico acoplado a un pretratamiento de oxidación avanzada*.
- Peinado-Guevara, V., Peinado Guevara, H., Campista Leon, S., & Delgado Rodríguez, O. (2015). Análisis de la producción agrícola y gestión del agua en módulos de riego del distrito 063 de Sinaloa, México. *Estudios Sociales: Revista de Investigación Científica*, 23(46), 115–136.
- Pineda Arellano, C. A., González, A. J., Martínez, S. S., Salgado-Tránsito, I., & Franco, C. P. (2013). Enhanced mineralization of atrazine by means of photodegradation processes using solar energy at pilot plant scale. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 272, 21–27. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2013.08.020>
- Rodríguez-Mata, A. E., Amabilis-Sosa, L. E., Roé-Sosa, A., Barrera-Andrade, J. M., Rangel-Peraza, J. G., & Salinas-Juárez, M. G. (2019). Quantification of recalcitrant organic compounds during their removal test by a novel and economical method based on chemical oxygen demand analysis. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 36(3), 423–432. <https://doi.org/10.1007/s11814-018-0203-9>
- Rodriguez-Narvaez, O. M., Peralta-Hernandez, J. M., Goonetilleke, A., & Bandala, E. R. (2017). Treatment technologies for emerging contaminants in water: A review. *Chemical Engineering Journal*, 323(April), 361–380. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.04.106>
- Roé-Sosa, A., Rangel-Peraza, J. G., Rodríguez-Mata, A. E., Pat-Espadas, A., Bustos-Terrones, Y., Diaz-Peña, I., ... Amabilis-Sosa, L. E. (2019). Emulating natural wetlands oxygen conditions for the removal of N and P in agricultural wastewaters. *Journal of Environmental Management*, 236(November 2018), 351–357. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.01.114>
- Sarria, V., Parra, S., Adler, N., Péringer, P., Benitez, N., & Pulgarin, C. (2002). Recent developments in the coupling of photoassisted and aerobic biological processes for the treatment of biorecalcitrant compounds. *Catalysis Today*, 76(2–4), 301–315. [https://doi.org/10.1016/S0920-5861\(02\)00228-6](https://doi.org/10.1016/S0920-5861(02)00228-6)
- Sindelar, H. R., Lloyd, J., Brown, M. T., & Boyer, T. H. (2016). Transformation of dissolved organic phosphorus to phosphate using UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 35(3), 680–691. <https://doi.org/10.1002/ep.12272>
- Smith, D. R., King, K. W., Johnson, L., Francesconi, W., Richards, P., Baker, D., & Sharpley, A. N. (2015). Surface Runoff and Tile Drainage Transport of Phosphorus in the Midwestern United States. *Journal of Environmental Quality*, 44(2), 495–502. <https://doi.org/10.2134/jeq2014.04.0176>
- Urtiaga, A. M., Pérez, G., Ibáñez, R., & Ortiz, I. (2013). Removal of pharmaceuticals from a WWTP secondary effluent by ultrafiltration / reverse osmosis followed by electrochemical oxidation of the RO concentrate. *DES*, 331, 26–34. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.10.010>