



Coagulación y oxidación en el tratamiento de aguas residuales porcinas

Coagulation and oxidation in the treatment of swine wastewater

Coagulação e oxidação no tratamento de águas residuais de suínos

Autor

- ✉ **Adrian David Vélez Zambrano**
adrian.velez@espam.com.ec
- ✉ **Jorge Alessandro Zambrano Rosados**
jorge.zambranor@espam.com.ec
- ✉ **Carlos Banchón***
carlos.banchon@espam.com.ec

Escuela Superior Politécnica
Agropecuaria de Manabí "Manuel
Félix López" ESPAM MFL. Carrera de
Ingeniería Ambiental. Ecuador.

* Autor para correspondencia.

Editor Académico
Alejandro Altamirano-Briones

Citación sugerida: Vélez Zambrano, A. D., Zambrano Rosados, J. A. y Banchon, C. (2025). Coagulación y oxidación en el tratamiento de aguas residuales porcinas. *Revista Bases de la Ciencia*, 9(3), 27-42. DOI: <https://doi.org/10.33936/revbasdelaciencia.v9i3.7040>

Recibido: 05/10/2024
Aceptado: 06/10/2024
Publicado: 09/12/2024

Resumen

El presente estudio aborda la gestión de desechos generados por la cría intensiva de cerdos, enfocándose en soluciones sostenibles para el tratamiento de aguas residuales porcinas mediante procesos físico-químicos. A partir de los resultados obtenidos, se demostró que el proceso de coagulación-floculación, utilizando coagulantes como el policloruro de aluminio (PAC) y floculantes como la poliacrilamida (PAM), es altamente eficaz para reducir la turbidez de las aguas residuales, alcanzando una remoción de turbidez del 100% con concentraciones óptimas. Sin embargo, su efecto sobre la conductividad eléctrica (CE) y los sólidos totales (ST) fue limitado. En cuanto a los métodos de oxidación química, el uso de hipoclorito de sodio y ozono se evaluó por su capacidad de oxidación. El ozono mostró una mayor eficiencia y estabilidad en la reducción de la CE, turbidez y ST, logrando una disminución del 55.3% en la CE y la eliminación total de la turbidez en tan solo cuatro minutos de tratamiento. Estos hallazgos destacan el potencial del ozono como una opción más efectiva y rápida en comparación con el hipoclorito de sodio, que aunque también fue eficaz, presentó una mayor variabilidad en los parámetros evaluados. En conclusión, la combinación de procesos de coagulación-floculación y oxidación química, especialmente mediante ozono, ofrece una estrategia prometedora para mitigar la contaminación ambiental asociada a la producción porcina, mejorando la calidad del agua residual y minimizando los riesgos para la salud humana y el medio ambiente.

Palabras clave: Ozono, Oxidación, Coagulación, Floculación, Industria Porcina.

Abstract

The present study addresses the management of waste generated by intensive pig farming, focusing on sustainable solutions for the treatment of pig wastewater through physical-chemical processes. From the results obtained, it was demonstrated that the coagulation-flocculation process, using coagulants such as polyaluminium chloride (PAC) and flocculants such as polyacrylamide (PAM), is highly effective in reducing wastewater turbidity, achieving 100% turbidity removal with optimal concentrations. However, its effect on electrical conductivity (EC) and total solids (TS) was limited. Regarding chemical oxidation methods, the use of sodium hypochlorite and ozone was evaluated for their oxidation purification capacity. Ozone showed greater efficiency and stability in reducing EC, turbidity and TS, achieving a 55.3% decrease in EC and total elimination of turbidity in just four minutes of treatment. These findings highlight the potential of ozone as a more effective and faster option compared to sodium hypochlorite, which, although also effective, presented greater variability in the parameters evaluated. In conclusion, the combination of coagulation-flocculation and chemical oxidation processes, especially using ozone, offers a promising strategy to mitigate environmental pollution associated with pig production, improving wastewater quality and minimizing risks to human health and the environment.

Keywords: Ozone, Oxidation, Coagulation, Flocculation, Swine Industry.

Resumo

O presente estudo aborda a gestão dos resíduos gerados pela suinocultura intensiva, com foco em soluções sustentáveis para o tratamento de águas residuais da suinocultura por meio de processos físico-químicos. A partir dos resultados obtidos, foi demonstrado que o processo de coagulação-floculação, utilizando coagulantes como o policloreto de alumínio (PAC) e floculantes como a poliacrilamida (PAM), é altamente eficaz na redução da turbidez de águas residuais, atingindo 100% de remoção de turbidez com concentrações ideais. No entanto, o seu efeito na condutividade elétrica (CE) e nos sólidos totais (ST) foi limitado. Em relação aos métodos de oxidação química, avaliou-se o uso de hipoclorito de sódio e ozônio quanto à sua capacidade de purificação da oxidação. O ozônio apresentou maior eficiência e estabilidade na redução de CE, turbidez e ST, alcançando redução de 55,3% na CE e eliminação total da turbidez em apenas quatro minutos de tratamento. Esses achados destacam o potencial do ozônio como uma opção mais eficaz e rápida em comparação ao hipoclorito de sódio, que embora também tenha sido eficaz, apresentou maior variabilidade nos parâmetros avaliados. Em conclusão, a combinação de processos de coagulação-floculação e oxidação química, especialmente utilizando ozônio, oferece uma estratégia promissora para mitigar a poluição ambiental associada à produção de carne suína, melhorando a qualidade das águas residuais e minimizando os riscos para a saúde humana e o meio ambiente.

Palavras-chave: Ozônio, oxidação, coagulação, floculação, indústria suína.





INTRODUCCIÓN

La cría intensiva de cerdos en países como China, Estados Unidos y la Unión Europea resulta en la generación aproximada de 2 millones de toneladas diarias de desechos fecales (FAO, 2022). La mala gestión de los desechos derivados del estiércol de cerdo, a pesar de ser una práctica agrícola extendida a nivel global, contamina los recursos naturales, amenaza la salud humana y el medio ambiente, y su impacto se agrava en áreas con acceso limitado al agua. Esta práctica está asociada al incremento de la contaminación del suelo, la propagación de zoonosis, la lixiviación de nutrientes y la consecuente eutrofización de fuentes de agua (Gao *et al.*, 2023). Incluso, el estiércol porcino se revela como una fuente de genes de resistencia antibiótica (GRA) (López Fenández *et al.*, 2023). Dada la creciente preocupación por la escasez de agua dulce, agravada por el cambio climático, abordar estos desafíos planteados por la cría de cerdos es de suma relevancia.

La problemática planteada en el presente estudio se asienta dado que, la producción porcina genera un volumen significativo de aguas residuales cargadas de materia orgánica, nutrientes y antibióticos, derivados de factores ambientales diversos (Parra y Zambrano, 2021; Ramírez y Rodríguez, 2017). En América Latina, se estima que un cerdo de 70 kg produce de 4 a 5 kg de excretas diarias, de las cuales el 90% corresponde a heces y el 10% a orina (Maisonave *et al.*, 2019).

Los desechos porcinos, cuando se usan como fertilizante, contaminan cuerpos de agua, especialmente en granjas con grandes concentraciones de cerdos, que pueden albergar entre 300,000 y 500,000 animales (Bidigare, 2014). Las aguas residuales generadas en las granjas porcinas varían de 17 a 62 litros por Unidad de Producción Animal al día (Semerena *et al.*, 2003). La eficiencia en el tratamiento de estos efluentes es baja, con tasas de remoción por debajo del 50%, y la DQO en granjas pequeñas (hasta 2,500 cerdos) oscila entre 3,478 y 9,300 mg/L, mientras que en granjas medianas y grandes puede llegar a 40,498 mg/L (Garzón Zúñiga & Buelna, 2014).

La actividad porcina genera una carga orgánica significativa: 670,174 cerdos producen diariamente 3,884.78 toneladas de excrementos y 9,428.37 m³ de aguas residuales, equivalente a las descargas domésticas de 4,431,334 personas (Novelo *et al.*, 2009). En tales términos, la gestión inadecuada de aguas residuales en la producción porcina plantea serios riesgos ambientales y de salud, resaltando la necesidad de mejorar las prácticas de tratamiento y manejo de estos desechos.

Los digestores anaeróbicos han demostrado ser una tecnología efectiva para la remediación de desechos porcinos en diversos países. En un estudio realizado en hatos porcinos en Cuba, se observó una alta eficiencia en la remoción de la demanda química de oxígeno (DQO) y de los sólidos suspendidos totales (SST), alcanzando valores del 90% y 70.84%, respectivamente; el pH de las muestras osciló entre 6.5 y 7.5 (Blanco *et al.*, 2015). En China, se obtuvo una notable eficiencia en la digestión anaerobia bajo condiciones térmicas, con una producción de 507 mL de metano por gramo de sólidos volátiles y una eliminación de DQO del 85% (Mosquera *et al.*, 2024).

Los procesos biológicos utilizados en el tratamiento de desechos porcinos presentan desafíos de ingeniería, ya que son sensibles a las condiciones climáticas. Además, la lenta cinética microbiana aumenta las dimensiones y costos de los reactores, genera malos olores, y demanda un mantenimiento constante (Lourinho *et al.*, 2020). Por tanto, complementar con tratamientos físico-químicos y biológicos como coagulación-floculación, y oxidación, es esencial para mejorar la gestión de residuos porcinos (Babanova *et al.*, 2020; Hollas *et al.*, 2023).

La digestión anaeróbica se destaca como una tecnología para el tratamiento de residuos orgánicos. No obstante, su implementación a gran escala para la valorización del estiércol porcino se asocia con costos elevados (González *et al.*, 2020). Con el objetivo de proporcionar alternativas para el tratamiento de desechos porcinos, el presente trabajo busca ampliar el conocimiento sobre el tratamiento de aguas residuales porcinas, centrándose en la evaluación de procesos físico-químicos.

En el contexto de aportar con soluciones a la problemática de aguas residuales porcinas, los principales aportes del presente trabajo son: (i) la implementación de procesos de coagulación-floculación para la remoción efectiva de sólidos totales en aguas residuales porcinas; (ii) la evaluación de la concentración óptima de productos químicos en los procesos de coagulación-floculación y oxidación química; y (iii) la aplicación de hipoclorito de sodio y ozono como métodos de oxidación de aguas residuales porcinas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Muestreo

El estudio se realizó en el hato porcino de la ESPAM-MFL, ubicado en Calceta, cantón Bolívar, Manabí, con 34 lechones y 8 cerdos, en donde se generan 2500 L de agua residual diarios. Los sólidos totales (Método 2540), turbidez (Método 2130B), pH (Método 4500) y conductividad eléctrica (Método 2510) se midieron según métodos estándar (APHA, 2017). La muestra de agua residual se recolectó del tanque de recepción del hato (Figura 1), y su transporte se realizó conforme a la norma INEN 2169 (2013).



Figura 1. Muestra de agua residual porcina del hato porcino de la ESPAM-MFL.

En un equipo de floculación (Phibss and Bernd, Modelo 700, EE. UU.), se llevaron a cabo pruebas de jarras con volúmenes de 500 mL de agua residual porcina. Para promover la coagulación, la mezcla de los productos químicos se realizó a 200 rpm durante 2 minutos, seguida de un proceso de floculación a 30 rpm durante 5 minutos.

La sedimentación, sin ninguna mezcla, se llevó a cabo durante 30 minutos sin ajustes de pH. Se utilizó policloruro de aluminio (PAC, Fengbai, China, 99% de pureza) como coagulante y poliacrilamida aniónica (PAM, Sigma-Aldrich, USA, 99% de pureza) como floculante.

Se aplicó un diseño factorial completamente al azar (DFCA) que consideró la interacción de dos factores (dosis de coagulante PAC y dosis de floculante PAM) en tres niveles (-1, 0, +1), generando así 9 tratamientos con 3 réplicas, para un total de 27 unidades experimentales. Las variables dependientes medidas como respuestas fueron: turbidez, sólidos totales (ST), pH y conductividad eléctrica (CE). La Tabla 1 presenta el diseño experimental.



Tabla 1. Diseño experimental con sus respectivos factores y niveles

Tratamientos	PAC (mg/L)	PAM (mg/L)
T ₁	3000 (-1)	100 (-1)
T ₂	4000 (0)	100 (-1)
T ₃	6000 (+1)	100 (-1)
T ₄	3000 (-1)	400 (0)
T ₅	4000 (0)	400 (0)
T ₆	6000 (+1)	400 (0)
T ₇	3000 (-1)	700 (+1)
T ₈	4000 (0)	700 (+1)
T ₉	6000 (+1)	700 (+1)

Proceso de Oxidación

Para la oxidación, se empleó agua clarificada del proceso anterior utilizando las dosis óptimas de PAC y PAM. Se utilizaron como oxidantes hipoclorito de sodio comercial (Clorox, Ecuador) y gas ozono. La generación de ozono se realizó con un equipo de laboratorio capaz de producir 3 gramos de ozono por hora a partir de 0.5 L/min oxígeno ambiental, administrando dosis durante períodos de 1 a 4 minutos.

Se aplicó un diseño completamente al azar (DCA) unifactorial, que incluyó la adición de diferentes concentraciones de hipoclorito de sodio (5, 10, 25 y 50 mg/L) durante 30 minutos, junto con dosis de ozono de 100, 200, 300 y 400 mg/L. Este diseño contempló 3 repeticiones, lo que resultó en un total de 12 unidades experimentales, cada una con un volumen de 500 mL de agua tratada (Banchón, 2024). El porcentaje de remoción de contaminantes, se obtuvo con la siguiente fórmula:

$$\%E = \frac{Co - Cf}{Co} * 100 \quad (1)$$

Donde:

$\%E$ = Eficiencia de remoción (%)

Co = Contaminación inicial

Cf = Contaminación final

Para evaluar los efectos de diferentes tipos y dosis de coagulantes, floculantes y oxidantes sobre los parámetros de calidad del agua, se realizó un análisis de varianza de dos vías (ANOVA), junto con un ANOVA de una vía para comparar los tratamientos con el grupo de control, cumpliendo con los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza. Las diferencias entre los tratamientos se analizaron utilizando la prueba de Tukey, considerando significativos los valores con $p < 0.05$.

RESULTADOS

Efecto de la Coagulación-Floculación

El agua sin tratar (AR) presentó una CE inicial de 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y el tratamiento T7 (3000 mg/L PAC, 700 mg/L PAM) registró el valor más bajo de CE, cercano a los 2100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Fig. 2A). En promedio, se observó una reducción de hasta un 12.8% en la CE entre los tratamientos. En cuanto al pH (Fig. 2B), el agua sin tratar tuvo un valor inicial de 7.8, que

disminuyó tras los tratamientos. El pH más bajo se registró en el tratamiento T6 (6000 mg/L PAC, 400 mg/L PAM), cercano a 6, mientras que los tratamientos T1 y T7 mantuvieron el pH alrededor de 7.

La turbidez (Fig. 2C) mostró una reducción significativa en todos los tratamientos, pasando de un valor promedio de 72.7 NTU en el agua sin tratar a menos de 7 NTU en los tratamientos T2, T6 y T9. El tratamiento T3 (6000 mg/L PAC, 100 mg/L PAM) fue el más eficaz, logrando una máxima reducción de turbidez a 4.4 NTU, lo que representó una disminución del 94%.

En cuanto a los ST (Fig. 2D), el agua sin tratar tuvo un valor promedio de 1326.7 mg/L, siendo el tratamiento T7 (3000 mg/L PAC, 700 mg/L PAM) el que obtuvo una disminución del 9%; mientras que, el tratamiento T3 alcanzó una remoción promedio de 2% de sólidos totales.

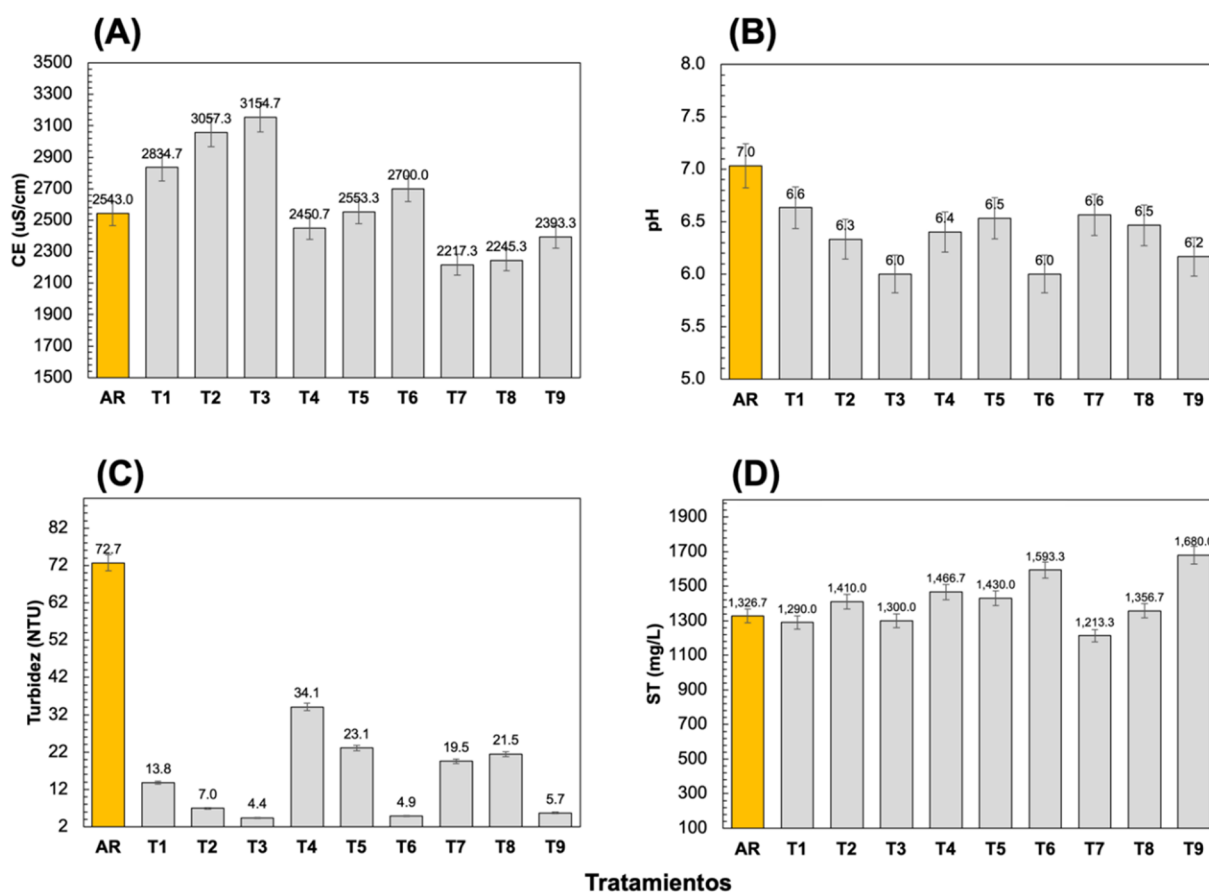


Figura 2. Efecto de adición de PAC y PAM en parámetros físico-químicos del agua.

La Figura 3 presenta diagramas de cajas que ilustran los efectos de los niveles de PAC y PAM en los parámetros físico-químicos del agua residual porcina. Se observa que la adición de PAC provoca un aumento en la CE a medida que se incrementa la dosis del coagulante; específicamente, el nivel más bajo (3000 mg/L) muestra un rango de 2000 a 2700 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mientras que el nivel más alto (6000 mg/L) alcanza hasta 3200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Fig. 3A). Por otro lado, aunque la PAM también incrementa la CE, los valores en su dosis máxima (700 mg/L) son inferiores, oscilando entre 2000 y 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. El impacto del PAC en la CE es notablemente más significativo en comparación con la PAM.

En cuanto al pH, se observa una disminución conforme aumenta la concentración de PAC, promediando 6.5 en el nivel más bajo y descendiendo a 5.8 en el más alto (Fig. 3B). Un patrón similar se presenta con la PAM, cuyo pH alcanza cerca de 5.5 en su dosis máxima. La turbidez muestra una reducción considerable con el aumento de PAC, pasando de aproximadamente 25 NTU en la dosis más baja a menos de 5 NTU en la más alta; la PAM también contribuye a esta



disminución, reduciendo la turbidez de 20 NTU a valores inferiores a 5 NTU en su nivel más alto (Fig. 3C).

En relación con los sólidos totales, se observa un aumento con la dosis de PAC, que varía de 1200 mg/L en el nivel más bajo a 1800 mg/L en el más alto; este patrón se repite con la PAM, que también alcanza hasta 1800 mg/L en su máxima dosis (Fig. 3D). En resumen, el incremento en las concentraciones de PAC y PAM tiende a elevar la conductividad eléctrica y los sólidos totales, mientras que se produce una disminución en el pH y la turbidez, siendo más pronunciados estos efectos en las concentraciones más altas de ambos tratamientos, lo que sugiere una mayor eficiencia en la remoción de turbidez.

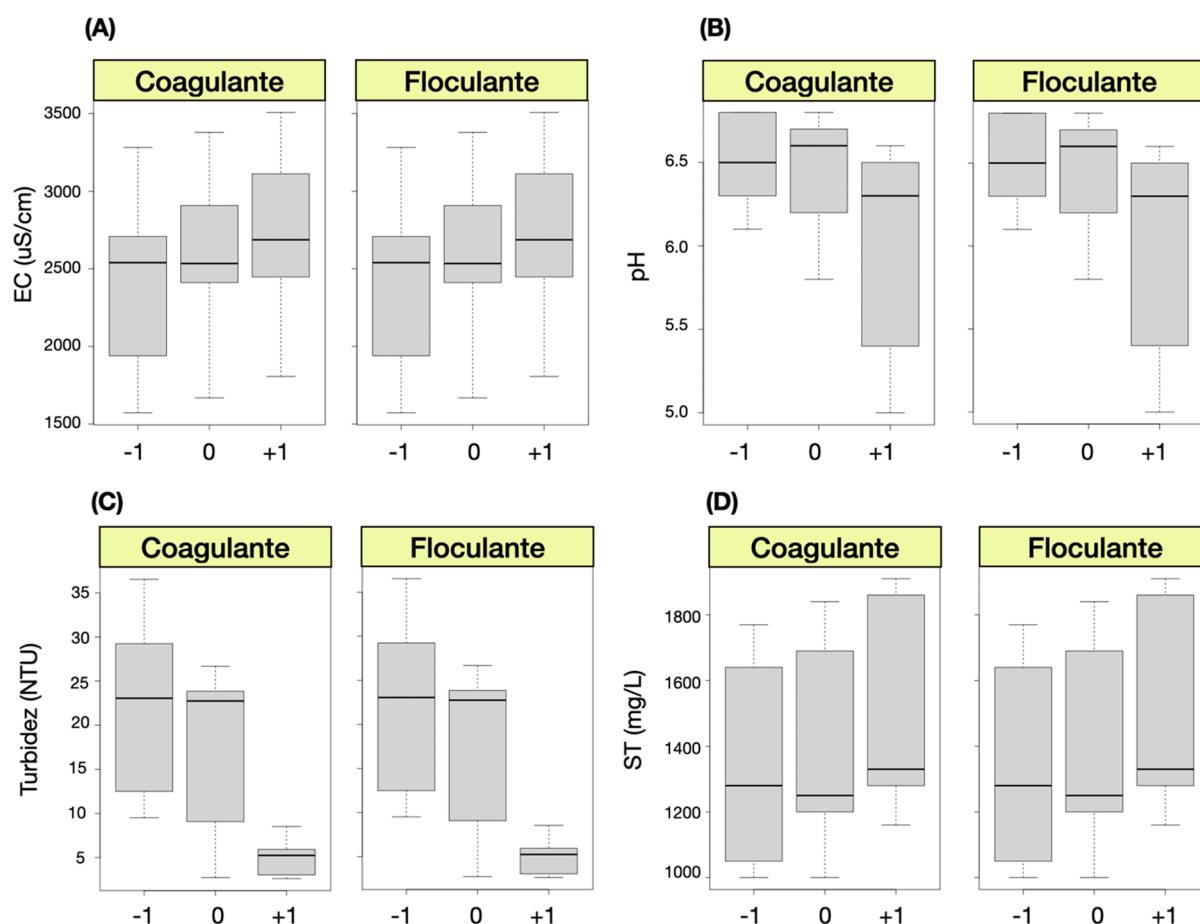


Figura 3. Diagrama de cajas para los tratamientos de PAC y PAM para agua residual porcina en función de parámetros físico-químicos del agua.

El análisis de varianza (ANOVA) presentado en la Tabla 2 evalúa el impacto del coagulante PAC, el floculante PAM y su interacción sobre el pH, la CE, la turbidez y los ST del agua residual. Para el pH, el ANOVA muestra que el PAC tiene un efecto altamente significativo ($p < 0.001$), lo que indica que su adición altera de manera considerable el pH del agua. En contraste, la PAM y la interacción entre ambos productos no presentan efectos significativos sobre este parámetro. En cuanto a la CE, los resultados sugieren que ni el PAC ni la PAM, de manera individual, tienen un efecto significativo. Sin embargo, la interacción entre ambos productos químicos sí resultó efectiva en la disminución de la CE.

Respecto a la turbidez, tanto el coagulante como el floculante mostraron efectos altamente significativos en su reducción ($p < 0.001$). Además, la interacción entre PAC y PAM también fue significativa ($p < 0.05$), lo que subraya su impacto combinado en la mejora de la claridad del agua.

En el caso de los ST, el PAC mostró un efecto marginalmente significativo ($p < 0.1$), mientras que ni la PAM ni su interacción con el PAC tuvieron efectos relevantes sobre la reducción de los sólidos totales.

El análisis revela que el PAC tiene un impacto decisivo en el pH y los ST, mientras que tanto el PAC como la PAM, así como su interacción, juegan un papel clave en la reducción de la turbidez.

Tabla 2. Resumen de valores F del ANOVA

Factor	Gl	pH	CE	Turbidez	ST
Coagulante	1	17.748 (***)	1.245 (NS)	154.78 (***)	3.568 (.)
Floculante	1	0.045 (NS)	0.369 (NS)	20.74 (***)	0.636 (NS)
Coag.:Floc.	1	0.241 (NS)	0.017 (*)	5.98 (*)	0.130 (NS)

Gl = Grados de libertad. Códigos de significancia: 0 (***) 0.001 (**) 0.01 (*) 0.05 (.) 0.1 (-) No Significativo (NS)

El análisis post-hoc de Tukey (Tabla 3) proporciona una visión detallada de las diferencias entre los tratamientos aplicados, ayudando a interpretar los resultados del ANOVA. Para el pH, se observa que los tratamientos con concentraciones más altas de PAC y PAM reducen significativamente el pH en comparación con otros tratamientos.

En la CE, no se encuentran diferencias significativas entre los tratamientos, lo que respalda los resultados del ANOVA. En cuanto a la turbidez, se observan reducciones significativas con los tratamientos de mayor concentración de coagulante y floculante, siendo el tratamiento T3 (6000 mg/L PAC / 100mg/L PAM) el más eficaz. Finalmente, para los ST, no se detectan diferencias significativas entre los tratamientos, lo cual es consistente con los hallazgos del ANOVA. En conclusión, el PAC tiene un impacto significativo en la reducción del pH y la turbidez del agua residual porcina.

La adición del floculante PAM también contribuye a la reducción de la turbidez, especialmente en concentraciones más altas. Sin embargo, ni el coagulante ni el floculante parecen influir de manera significativa en la CE o en los ST del agua residual, de acuerdo con los resultados obtenidos.

Tabla 3. Resumen de promedios para el análisis Tukey HSD

Coagulante/Floculante	pH	CE	Turbidez	ST
0	7.03 ^a	2543.00 ^a	72.66 ^a	1326.66 ^a
3000 mg/L / 100 mg/L	6.53 ^a	2500.88 ^a	22.48 ^b	1323.33 ^a
4000 mg/L / 400 mg/L	6.44 ^{ab}	2618.66 ^a	17.18 ^b	1398.88 ^a
6000 mg/L / 700 mg/L	6.05 ^b	2749.33 ^a	5.00 ^c	1524.44 ^a

Letras idénticas por parámetro indican diferencias no significativas

En la Figura 3, se presenta un modelo de superficie de respuesta (RSM, por sus siglas en inglés) que evalúa la relación entre la turbidez (NTU) y las concentraciones de coagulante y floculante (medidas en mg/L) en un experimento de coagulación y floculación.

El modelo presenta un error estándar residual de 8.842 con 26 grados de libertad, y muestra un coeficiente de determinación múltiple (R^2) de 0.8373, lo que indica que el 83.73% de la variabilidad en la turbidez puede explicarse por el modelo. El R^2 ajustado es de 0.8185, lo que corrige el R^2 en función del número de predictores en el modelo, sugiriendo que el modelo está ajustado a los datos observados.



La Figura 3 ilustra cómo la turbidez varía en función de las concentraciones de coagulante y floculante, con una superficie que va desde valores bajos de turbidez (en verde) hasta valores más altos (en rojo y morado). Esto sugiere que la combinación de niveles específicos de coagulante y floculante tiene un impacto significativo en la reducción de la turbidez.

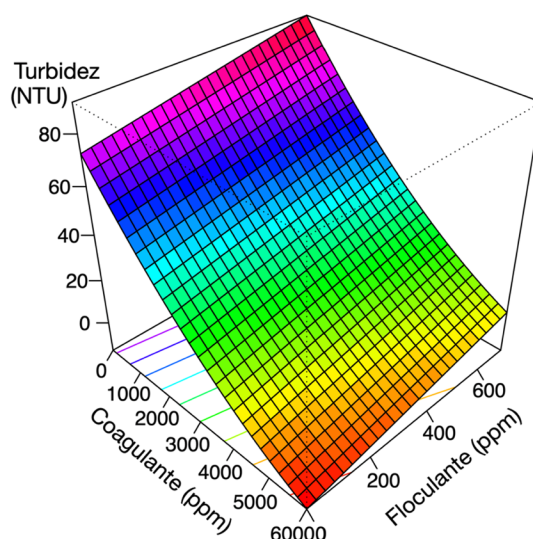


Figura 3. Modelo de Superficie de Respuesta. Error estándar residual: 8.842 con 26 grados de libertad, R-cuadrado múltiple: 0.8373, R-cuadrado ajustado: 0.8185, estadístico F: 44.59 con 3 y 26 grados de libertad, valor p: 2.164×10^{-10} .

Efecto de la Oxidación Química

En la Figura 4, se presentan muestran los resultados de la oxidación mediante dos métodos de tratamiento diferentes a partir de agua tratada con coagulación-floculación: el uso de hipoclorito de sodio en concentraciones medidas en mg/L (Fig. 4 A, B, C y D) y el empleo de ozono (Fig. 4 E, F, G y H) evaluados en función del tiempo (minutos). En cuanto a la CE, se observa una disminución promedio de 59.8% a una dosis de 50 mg/L de hipoclorito de sodio (Fig. 4A).

Este comportamiento sugiere que el cloro es eficaz en la reducción de iones disueltos en las primeras fases del tratamiento. Por otro lado, el pH experimenta incrementos oscilantes hasta un valor de 8.2, en función de la dosis de hipoclorito de sodio (Fig. 4B), lo que podría indicar que la introducción de cloro genera reacciones químicas que alteran temporalmente el equilibrio ácido-base del agua. Respecto a la turbidez, ésta disminuye hasta el 100% conforme aumenta la dosis de cloro a partir de 100 mg/L de hipoclorito de sodio, lo que implica una reducción de las partículas suspendidas, aunque este efecto parece estabilizarse en dosis más elevadas (Fig. 4C).

Finalmente, los ST (Fig. 4D) muestran un patrón complejo, con una disminución de hasta un 38% y también de un aumento en la concentración de sólidos totales, lo que podría estar relacionado con la formación y precipitación de sólidos durante el proceso de oxidación.

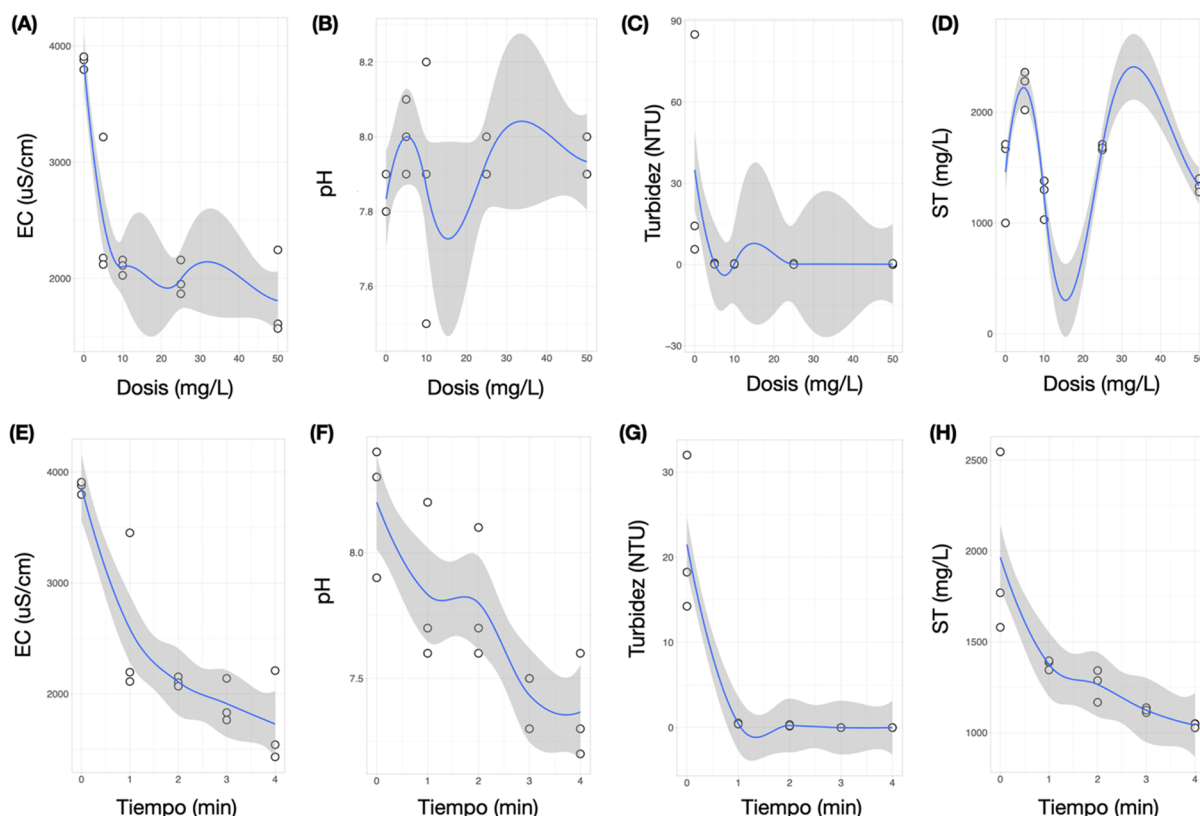


Figura 4. Efecto de la oxidación química con hipoclorito de sodio (A-D) y ozono (E-H).

En el tratamiento con ozono, se observó una disminución de la CE de hasta un 55.3% tras 4 minutos de tratamiento con 400 mg/L de ozono, lo que indica una mayor eficiencia en la reducción de iones disueltos a medida que avanza el proceso (Fig. 4E). El pH disminuyó gradualmente desde un valor promedio de 8.2 hasta 7.4, lo que sugiere la posible formación de ácidos débiles debido a la oxidación de ciertos contaminantes (Fig. 4F).

La turbidez (Fig. 4G) se redujo en los primeros minutos y luego se estabilizó, logrando una reducción total del 100% con 400 mg/L de ozono. Esto demuestra la alta efectividad del ozono en la eliminación de partículas suspendidas, partiendo de una turbidez inicial promedio de 21.5 NTU. De manera similar, los ST (Fig. 4H) disminuyeron rápidamente al inicio del tratamiento, estabilizándose después con una reducción del 45%, destacando la eficacia del ozono en la separación de sólidos.

Tanto el ozono como el cloro demostraron ser efectivos para mejorar la calidad del agua en términos de reducción de CE, pH, turbidez y ST. Sin embargo, el ozono mostró una eficiencia superior, especialmente en la rapidez del tratamiento, logrando reducciones significativas en pocos minutos. Aunque el cloro es eficaz en dosis bajas, su desempeño es menos estable a concentraciones más altas. Por lo tanto, en términos de no alterar significativamente el pH inicial, y mayor reducción de ST, el ozono se posiciona como el método recomendado, ofreciendo resultados más rápidos y un control más predecible sobre los parámetros de calidad del agua.

En la Tabla 4 de ANOVA, se presentan los valores F para cada tratamiento y parámetro evaluado, lo que permite identificar la significancia estadística de los efectos de cada tratamiento. Los resultados indican que la cloración tiene un efecto significativo en la CE con un valor F de 21.70 ($p < 0.001$), sugiriendo que la cloración reduce de manera efectiva la CE. Sin embargo, para el pH, turbidez y ST, los valores F no alcanzan significancia estadística o están en el umbral de la significancia (3.43 para la turbidez con $p \approx 0.1$).



Esto indica que el cloro podría no ser tan eficaz para modificar estos parámetros en comparación con la CE. Contrariamente, la ozonificación muestra efectos altamente significativos ($p < 0.001$) en todos los parámetros evaluados, con valores F muy altos, como 67.04 para CE y 52.15 para pH. Esto sugiere que el ozono tiene un impacto considerable en la calidad del agua, mejorando todos los parámetros de manera significativa. La elevada significancia para todos los parámetros indica que la ozonificación es un método más robusto y efectivo en comparación con la cloración.

Tabla 4. Resumen de valores F del ANOVA del tratamiento de cloración y ozonificación

Factor	Gl	pH	CE	Turbidez	ST
Cloración	1	0.333 (NS)	21.70 (***)	3.43 (.)	2.707 (NS)
Ozonificación	1	52.15 (***)	67.04 (***)	22.73 (***)	45.29 (***)

Gl = Grados de libertad. Códigos de significancia: 0 (***) 0.001 (**) 0.01 (*) 0.05 (.) 0.1 (-) No Significativo (NS)

El test de Tukey HSD (Tabla 5) comparó los promedios de parámetros bajo diversas dosis de cloro y tiempos de ozonificación, identificando diferencias significativas entre tratamientos. No se encontraron diferencias significativas en el pH entre las dosis de cloro. La CE y la turbidez disminuyeron significativamente con dosis de cloro superiores a 5 mg/L y 10 mg/L, respectivamente. Los sólidos totales fueron mayores a 5 mg/L, sugiriendo reprecipitación.

Con la ozonificación, el pH disminuyó, indicando acidificación progresiva. La CE y la turbidez también disminuyeron significativamente con el tiempo, mostrando eficacia del ozono en la eliminación de partículas y sólidos. ANOVA y Tukey HSD sugieren que la ozonificación es más efectiva y consistente que la cloración en la mejora de la calidad del agua, afectando significativamente todos los parámetros evaluados.

Tabla 5. Resumen de promedios para el análisis Tukey HSD

Cloración	pH	CE	Turbidez	ST
0	7.83 ^a	3861.66 ^a	34.97 ^a	1460.00 ^b
5	8.00 ^a	2504.66 ^b	0.36 ^{ab}	2220.00 ^a
10	7.86 ^a	2099.33 ^b	0.25 ^b	1236.66 ^b
25	7.93 ^a	1992.66 ^b	0.17 ^b	1683.33 ^{ab}
50	7.93 ^a	1808.66 ^b	0.16 ^b	1336.66 ^b
Ozonificación	pH	CE	Turbidez	ST
0	8.20 ^a	3861.66 ^a	21.50 ^a	1965.33 ^a
1	7.83 ^{ab}	2586.66 ^b	0.46 ^b	1376.00 ^b
2	7.80 ^{bc}	2108.33 ^{bc}	0.25 ^b	1265.33 ^b
3	7.43 ^{cd}	1912.33 ^{bc}	0.00 ^b	1124.00 ^b
4	7.36 ^d	1728.00 ^c	0.00 ^b	1041.66 ^b

Letras idénticas por parámetro indican diferencias no significativas

DISCUSIÓN

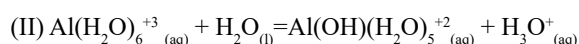
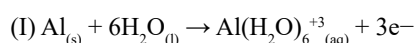
Efecto de la coagulación-floculación

La coagulación, clave en el tratamiento de efluentes porcinos, reduce contaminantes mediante coagulantes como policloruro de aluminio, polisilicato aluminio-férrico y cloruro de dimetilamonio polidialílico, que eliminan coloides, turbidez y sólidos suspendidos a través de neutralización de cargas y agregación (Banet *et al.*, 2020; Chen *et al.*, 2021; Deng *et al.*, 2023; Domingues *et al.*, 2023; Yi *et al.*, 2024).

La neutralización de cargas es un mecanismo clave, ya que coagulantes de alta carga positiva como el FeCl_3 o PAC neutralizan las repulsiones eléctricas entre partículas suspendidas, facilitando la formación de flóculos más grandes y mejorando la sedimentación y filtración (Banet *et al.*, 2020).

Según la reacción (I), una sal de aluminio se disuelve en agua y pierde tres electrones. Debido a que el átomo de aluminio tiene 6 electrones restantes en su estado eléctrico, la hidratación del ion toma la forma $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{+3}$.

En la reacción (II), el catión Al^{+3} en $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{+3}$ forma un ion complejo al enlazarse con un átomo de oxígeno de una de las moléculas de agua, aumentando la polaridad de los enlaces O–H. Esto facilita la ionización de los átomos de hidrógeno, provocando la acidificación de la solución por la hidrólisis del catión metálico y la liberación de protones (Banchón, 2024).



En el presente estudio, el pH disminuyó a medida que aumentó la concentración de PAC y PAM, llegando a valores cercanos a 5.0. Este efecto ácido se explica por la hidrólisis del Al^{+3} (ácido de Lewis), que libera H^+ al reaccionar con los iones OH^- del efluente. En otro estudio, se observó que dosis de FeCl_3 de 0.024 mol/L (3892.9 mg/L), junto con 0.1649 mL/L de floculante catiónico y un pH de 7.5, resultaron óptimos para reducir el 99% de la turbidez (El bied *et al.*, 2021).

Un estudio en Portugal mostró que la poliacrilamida no iónica (NPAM) promueve la reducción del DQO (75%), NH_4^+-N (99.1%), fósforo total (94.9%) y nitrógeno total (99.1%) en aguas residuales porcinas, a pH=11 ajustado con hidróxido de calcio (Lee & Chang, 2022). El coagulante de ferrita de aluminio polisilicato (FD-PSAF), preparado a partir de polvo de fundición, mostró una alta eficiencia en la remoción de contaminantes porcinos: DQO (50.4%), color (95.7%), turbidez (97.1%) y fosfato (99.7%) (Yi *et al.*, 2024).

Con efluentes porcinos de una granja situada en Gumi, Corea, empleando 2000 mg de sulfato de aluminio por litro de agua residual y un período de sedimentación de 30 minutos, resultó en una reducción del 99% de la turbidez (Kornboonraksa *et al.*, 2009). Por otro lado, en Irán, el efluente de granjas porcinas presentaba un pH inicial de 7.31, 3247 mg/L de sólidos suspendidos totales, una conductividad eléctrica de 9140 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 5817 mg/L de DQO, alcanzando hasta un 60% de reducción de sólidos suspendidos totales al emplear 100 mg/L de PAC (Bazrafshan *et al.*, 2012). Un estudio realizado en una granja en la región de Ribatejo, Portugal, mostró que, con un efluente de características iniciales de pH=7.4, 17,600 mg/L de sólidos totales y 11,000 mg/L de sólidos suspendidos, se lograron condiciones operativas óptimas al añadir 50 mg de Al por litro de efluente, seguido de 30 minutos de sedimentación, alcanzando una reducción máxima de la DQO del 41% y una reducción de la turbidez del 73% (Fragoso *et al.*, 2015).

En la industria porcina, la coagulación-floculación resulta fundamental permitiendo la reducción de contaminantes como materia orgánica y sólidos suspendidos, mediante el uso de policloruro de aluminio, el sulfato de aluminio y el FeCl_3 , que neutralizan cargas y favorecen la formación de flóculos, con eficiencias que varían según el tipo de coagulante y las condiciones de pH.



Efecto de la oxidación

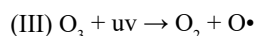
El tratamiento con hipoclorito de sodio muestra una disminución promedio del 59.8% en la CE a 50 mg/L, sugiere eficacia en la reducción de iones disueltos; el pH aumenta oscilantemente hasta 8.2 debido a reacciones químicas; la turbidez disminuye hasta el 100% a partir de 100 mg/L, aunque se estabiliza a dosis más altas; y los sólidos totales presentan un patrón complejo, con disminuciones de hasta un 38% y aumentos en concentración, posiblemente por la formación y precipitación de sólidos durante la oxidación.

Los cambios evidenciados en el aumento del pH y en la disminución de sólidos al añadir hipoclorito de sodio al agua tratada se debe a la formación de ácido hipocloroso (HOCl) e ion hipoclorito (OCl⁻), lo que genera iones hidróxido (OH⁻) a partir del NaOCl, los cuales reaccionan con la materia orgánica y producen radicales OH (Kim *et al.*, 2006). En aguas residuales porcinas, la presencia de materia orgánica natural (MON) incluye compuestos que promueven la producción de radicales OH, lo que genera reacciones en cadena con el cloro y aumenta el consumo de HOCl, alterando así el equilibrio ácido-base y provocando cambios significativos en el pH (Devi & Dalai, 2021).

Este alto consumo de HOCl influye en la eficacia de la reacción y en la formación de subproductos, como cloraminas, debido a la presencia de urea, amonio, nitritos y nitratos en el efluente (Jin *et al.*, 2011). En muestras de aguas residuales de instalaciones de producción porcina en Missouri, EE. UU., se determinó que una dosis de 30 mg/L de hipoclorito de sodio fue la más efectiva para inactivar bacterias en las lagunas de tratamiento, ya que dosis superiores no incrementaron significativamente la eficiencia de desinfección (Macauley *et al.*, 2006). De acuerdo con los estudios mencionados y otros trabajos, la mayoría de las investigaciones sobre el efecto del hipoclorito de sodio en aguas residuales porcinas se enfocan principalmente en la desinfección, en lugar de abordar su impacto en la reducción de variables fisicoquímicas.

Los resultados del presente estudio mostraron que, al utilizar ozono, se logró una reducción del 55.3% en la CE tras 4 min de tratamiento con 400 mg/L, y una reducción del 100% de la turbidez y 45% de ST, evidenciando su superior eficiencia y rapidez en la mejora de la calidad del agua en comparación con el hipoclorito de sodio, que aunque también fue efectivo, presentó un desempeño menos estable en términos de pH a concentraciones más altas. En estudios sobre desechos porcinos, se han requerido concentraciones de ozono de hasta 1000 mg/L para eliminar contaminantes persistentes (Domingues *et al.*, 2021; Yoon *et al.*, 2014). Aunque el ozono es más estable y efectivo para la oxidación directa en medio ácido, las condiciones alcalinas favorecen la formación de radicales hidroxilo, que también son potentes oxidantes.

Para la mayoría de los usos, un pH ligeramente ácido de 6 es óptimo para mantener la estabilidad del ozono y maximizar la eficiencia de la oxidación. Estudios indican que los sólidos suspendidos (SS) en el agua residual disminuyen con el tiempo, pero a medida que aumenta su concentración, la eficiencia se reduce debido a que los SS consumen ozono para generar radicales libres, lo que inicia la oxidación de compuestos de alto peso molecular, seguida por la descomposición de compuestos de bajo peso molecular (Xuan *et al.*, 2021); de esta forma, la oxidación química es adecuada para estabilizar compuestos refractarios de efluentes porcinos, ya que los radicales hidroxilo (OH•) promueven la mineralización (Domingues *et al.*, 2021). Las reacciones (III) y (IV) ilustran la formación de radicales hidroxilos:



Según el presente estudio, el tratamiento con ozono fue más eficiente y rápido que el hipoclorito de sodio en la reducción de contaminantes en aguas residuales porcinas, logrando mejores resultados en la disminución de turbidez, sólidos totales y conductividad, con una mayor estabilidad en el pH.

CONCLUSIONES

Este estudio concluye que, para el tratamiento de aguas residuales porcinas, la coagulación-floculación mediante PAC y PAM es efectiva en la reducción de la turbidez, siendo el PAC el principal agente en la disminución del pH y los sólidos totales. Sin embargo, estos productos no tienen un impacto significativo en la conductividad eléctrica ni en la reducción de sólidos totales, aunque su combinación optimiza la remoción de turbidez. Además, se evaluaron los métodos de oxidación con hipoclorito de sodio y ozono, mostrando este último una mayor eficiencia y estabilidad, logrando una reducción del 100% de la turbidez y un descenso notable en la conductividad eléctrica en menor tiempo. A pesar de que el hipoclorito de sodio también fue efectivo, presentó fluctuaciones en el pH y un comportamiento menos estable a concentraciones más altas, lo que lo hace menos eficiente en comparación con el ozono. Este estudio resalta que el ozono es superior en el tratamiento de contaminantes persistentes y en la mejora de la calidad del agua, gracias a su capacidad para generar radicales hidroxilo y oxidar compuestos orgánicos.

DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERÉS DE LOS AUTORES

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

REFERENCIAS

- APHA (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (23rd ed.). Washington DC: American Public Health Association.
- Babanova, S., Jones, J., Phadke, S., Lu, M., Angulo, C., Garcia, J., Carpenter, K., Cortese, R., Chen, S., Phan, T., & Bretschger, O. (2020). Continuous flow, large-scale, microbial fuel cell system for the sustained treatment of swine waste. *Water Environment Research*, 92(1), 60-72. <https://doi.org/10.1002/wer.1183>
- Banchón. (2024). Activated carbon-mediated advanced oxidation process for effective leachate treatment. *International Journal of Environmental Science and Technology*. <https://link.springer.com/article/10.1007/s13762-024-05641-5>
- Banet, T., Massey, M. S., Zohar, I., Litaor, M. I., & Ippolito, J. A. (2020). Phosphorus removal from swine wastewater using aluminum-based water treatment residuals. *Resources, Conservation & Recycling: X*, 6, 100039. <https://doi.org/10.1016/j.rcrx.2020.100039>
- Bazrafshan, E., Mostafapour, F. K., Farzadkia, M., Ownagh, K. A., & Mahvi, A. H. (2012). Slaughterhouse Wastewater Treatment by Combined Chemical Coagulation and Electrocoagulation Process. *PLOS ONE*, 7(6), e40108. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0040108>
- Bidigare-Curtis, H. (2014). A New Approach to Ohio Pig Farming. *Discussions*, 10(3). <http://www.inquiriesjournal.com/articles/966/a-new-approach-to-ohio-pig-farming>
- Blanco, D., Suárez, J., Jiménez, J., González, F., Álvarez, L. M., Cabeza, E., & Verde, J. (2015). Eficiencia del tratamiento de residuales porcinos en digestores de laguna tapada. *Pastos y Forrajes*, 38(4), 441-447. Recuperado en 05 de septiembre de 2025, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942015000400008&lng=es&tlng=es.
- Chen, R.-F., Wu, L., Zhong, H.-T., Liu, C.-X., Qiao, W., & Wei, C.-H. (2021). Evaluation of electrocoagulation process for high-strength swine wastewater pretreatment. *Separation and Purification Technology*, 272, 118900. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.118900>



- Deng, L., Zheng, D., Zhang, J., Yang, H., Wang, L., Wang, W., He, T., & Zhang, Y. (2023). Treatment and utilization of swine wastewater – A review on technologies in full-scale application. *Science of The Total Environment*, 880, 163223. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163223>
- Devi, P., & Dalai, A. K. (2021). Implications of breakpoint chlorination on chloramines decay and disinfection by-products formation in brine solution. *Desalination*, 504, 114961. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.114961>
- Domingues, E., Fernandes, E., Gomes, J., & Martins, R. C. (2021). Advanced oxidation processes perspective regarding swine wastewater treatment. *Science of The Total Environment*, 776, 145958. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145958>
- Domingues, E., Lincho, J., Fernandes, M. J., Gomes, J., & Martins, R. C. (2023). Low-cost materials for swine wastewater treatment using adsorption and Fenton's process. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29677-1>
- El bied, O., Kessler, M., Terrero, M. A., Fechtali, T., Cano, A. F., & Acosta, J. A. (2021). Turbidity and Chemical Oxygen Demand Reduction from Pig Slurry through a Coagulation Flocculation Process. *Agronomy*, 11(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/agronomy11112158>
- FAO. (2022). *Agricultural production statistics 2000-2022*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). <https://www.fao.org/3/cc9205en/cc9205en.pdf>
- Fragoso, R. A., Duarte, E. A., & Paiva, J. (2015). Contribution of Coagulation–Flocculation Process for a More Sustainable Pig Slurry Management. *Water, Air, & Soil Pollution*, 226(5), 131. <https://doi.org/10.1007/s11270-015-2388-4>
- Gao, F.-Z., He, L.-Y., Chen, X., Chen, J.-L., Yi, X., He, L.-X., Huang, X.-Y., Chen, Z.-Y., Bai, H., Zhang, M., Liu, Y.-S., & Ying, G.-G. (2023). Swine farm groundwater is a hidden hotspot for antibiotic-resistant pathogenic *Acinetobacter*. *ISME Communications*, 3(1), 34. <https://doi.org/10.1038/s43705-023-00240-w>
- Garzón Zúñiga, M. A., & Buelna, G. (2014). Caracterización de aguas residuales porcinas y su tratamiento por diferentes procesos en México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 30(1), 65-79.
- González, R., González, J., Rosas, J. G., Smith, R., & Gómez, X. (2020). Biochar and Energy Production: Valorizing Swine Manure through Coupling Co-Digestion and Pyrolysis. *C — Journal of Carbon Research*, 6(2), 43. <https://doi.org/10.3390/c6020043>
- Henao, J. L. C., & Criollo, N. K. R. (2017). Evaluación del proceso de tratamiento de aguas residuales porcícolas en la colonia agrícola de mínima seguridad de Acacias. <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/12384/2017juliethcort%C3%A9s.pdf?sequence=4>
- Hollas, C. E., Rodrigues, H. C., Bolsan, A. C., Venturin, B., Bortoli, M., Antes, F. G., Steinmetz, R. L. R., & Kunz, A. (2023). Swine manure treatment technologies as drivers for circular economy in agribusiness: A techno-economic and life cycle assessment approach. *Science of The Total Environment*, 857, 159494. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159494>

- INEN. (2013). Agua. Calidad de agua. Muestreo. Conservación. NTE INEN 2 169:98 A. Instituto Ecuatoriano de Normalización. <https://www.normalizacion.gob.ec/>
- Jin, J., El-Din, M. G., & Bolton, J. R. (2011). Assessment of the UV/Chlorine process as an advanced oxidation process. *Water Research*, 45(4), 1890-1896. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.12.008>
- Kim, H., Kwon, S., Han, S., Yu, M., Kim, J., Gong, S., & Colosimo, M. F. (2006). *New ORP/pH based control strategy for chlorination and dechlorination of wastewater: Pilot scale application* | *Water Science & Technology* | IWA Publishing. <https://iwaponline.com/wst/article-abstract/53/6/145/11919/New-ORP-pH-based-control-strategy-for-chlorination?redirectedFrom=fulltext>
- Kornboonraksa, T., Lee, S., Lee, S., & Lee, H. (2009). On-line monitoring of floc formation in various flocculants for piggy wastewater treatment. *Desalination and Water Treatment*, 1(1), 248-258. <https://doi.org/10.5004/dwt.2009.127>
- Lee, W.-C., & Chang, C.-C. (2022). Effectively Recycling Swine Wastewater by Coagulation–Flocculation of Nonionic Polyacrylamide. *Sustainability*, 14(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/su14031742>
- López Fenández, S., Amaya Chávez, A., Serrato Cuevas, R., Gómez Tenorio, G., & Roa Morales, G. (2023). Life cycle inventory for an organic swine waste treatment system. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 25(2), 1153-1167. <https://doi.org/10.1007/s10163-023-01606-x>
- Lourinho, G., Rodrigues & Brito, P. S. D. (2020). Recent advances on anaerobic digestion of swine wastewater. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 17(12), 4917-4938. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02793-y>
- Macauley, J., Qiang, Z., Adams, C., Surampalli, R., & Mormile, M. (2006). *Disinfection of swine wastewater using chlorine, ultraviolet light and ozone—ScienceDirect*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135406001928?via%3Dihub>
- Maisonnave, R., Millares, P., y Lamelas, K. (2019). Buenas Prácticas de Manejo y Utilización de Efluentes Porcinos. <https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/porcinos>
- Mosquera, A. M., Delgado, J. M., Ramón, A. A., Vásquez, J. E., & Peñuela, M. (2024). Evaluation of Biogas Production from Swine Manure Using a UASB Reactor (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) with Long-Term Operation. *Energies*, 17(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/en17112723>
- Novelo, M., Borges, C., Borges, V., Pérez, B., y Peraza, C. (2009). Estimación del potencial contaminante de las granjas porcinas y avícolas del estado de Yucatán. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46713053002>
- Parra, W., y Zambrano, R. (2021). Evaluación del potencial de producción de biogás de las aguas residuales de una planta porcina mediante digestión anaeróbica. <https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/PARRA%20SALINAS%20WILSON%20MARCELO.pdf>
- Ramírez, J. P. R., y Rodríguez, R. V. (2017). Impactos ambientales por las actividades agropecuarias de Jalisco, México: Primera década del siglo XXI. *Revista Estudios Ambientales - Environmental Studies Journal*, 5(1), Article 1. <https://doi.org/10.47069/estudios-ambientales.v5i1.727>
- Semerena, R. I. E., Drucker, A. G., González, V. G., y Rueda, S. M. (2003). La industria porcina en Yucatán: un análisis de la generación de aguas residuales. *Problemas del Desarrollo. Revista Latinoamericana de Economía*, 34(135). <https://doi.org/10.22201/ieec.20078951e.2003.135.7505>





- Xuan, F., Li, J., Azeem, M., Eida, M., Abbasi, M. W., Pan, S., & Yang, S. (2021). Ozone pretreatment to improve the physico-chemical and biological properties of livestock fecal water. *Environmental Engineering and Management Journal*, 20(11), Article 11. <https://eemj.eu/index.php/EEMJ/article/view/4420>
- Yi, J., Chen, Z., Xu, D., Wu, D., & Howard, A. (2024). Preparation of a coagulant of polysilicate aluminum ferric from foundry dust and its coagulation performance in treatment of swine wastewater. *Journal of Cleaner Production*, 434, 140400. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140400>
- Yoon, Y., Hwang, Y., Kwon, M., Jung, Y., Hwang, T.-M., & Kang, J.-W. (2014). Application of O_3 and O_3/H_2O_2 as post-treatment processes for color removal in swine wastewater from a membrane filtration system. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20(5), 2801-2805. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2013.11.010>

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES

Autor	Contribución
Adrián Vélez	Desarrollo de la investigación, redacción del manuscrito
Jorge Zambrano	Desarrollo de la investigación, redacción del manuscrito
Carlos Banchón	Asesoría de la investigación, revisión del manuscrito