

# Evaluación del Proceso de Oxidación de Agua Contaminada con Sangre en un Reactor Batch de Burbujeo

A.R. Maldonado-Farfán, Dr<sup>1</sup>, Y. Pacco-Illa<sup>2</sup>, L.P. Reyes-Rojas<sup>2</sup>, J.G. Soto-Puelles, Mgt<sup>2</sup> and U.R. Fernández Bernaola, MSc<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Instituto de Investigación Universidad y Región (IIUR), Perú, [amanda.maldonado@unsaac.edu.pe](mailto:amanda.maldonado@unsaac.edu.pe), [uriel.fernandez@unsaac.edu.pe](mailto:uriel.fernandez@unsaac.edu.pe)*

<sup>2</sup>*Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Perú, [112204@unsaac.edu.pe](mailto:112204@unsaac.edu.pe), [080183@unsaac.edu.pe](mailto:080183@unsaac.edu.pe), [jhonatan.soto@unsaac.edu.pe](mailto:jhonatan.soto@unsaac.edu.pe)*

Digital Object Identifier (DOI):  
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.578>  
ISBN: 978-958-52071-8-9 ISSN: 2414-6390

# Evaluación del Proceso de Oxidación de Agua Contaminada con Sangre en un Reactor Batch de Burbujeo

A.R. Maldonado-Farfán, Dr<sup>1</sup>, Y. Pacco-Illa<sup>2</sup>, L.P. Reyes-Rojas<sup>2</sup>, J.G. Soto-Puelles, Mgt<sup>2</sup> and U.R. Fernández Bernaola, MSc<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Instituto de Investigación Universidad y Región (IIUR), Perú, [amanda.maldonado@unsaac.edu.pe](mailto:amanda.maldonado@unsaac.edu.pe), [uriel.fernandez@unsaac.edu.pe](mailto:uriel.fernandez@unsaac.edu.pe)

<sup>2</sup>Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Perú, [112204@unsaac.edu.pe](mailto:112204@unsaac.edu.pe), [080183@unsaac.edu.pe](mailto:080183@unsaac.edu.pe), [jhonatan.soto@unsaac.edu.pe](mailto:jhonatan.soto@unsaac.edu.pe)

**Resumen**— Los efluentes generados en el beneficio de pollos contienen elevados valores de turbidez debido a la presencia de sólidos en suspensión, materia orgánica, coliformes totales, grasas, entre otros. El objetivo de la investigación fue evaluar el proceso de oxidación con  $H_2O_2$  del efluente del matadero “Granja Quispe”, en un reactor batch de burbujeo, con un sistema de control de flujo de aire, velocidad de agitación y temperatura; así como un sistema de adquisición de datos de turbiedad y pH, mediante microcontroladores Arduino. Se estudió el efecto de las variables flujo de aire inyectado al reactor (F), velocidad de agitación (V) y concentración de  $H_2O_2$  (C) sobre la reducción de la turbidez (% TUE), mediante un diseño experimental factorial  $2^3$ , utilizando el método de superficie respuesta. Los resultados precisaron que a mayor F, V y C mayor reducción de la turbidez; siendo la variable de mayor efecto y significancia estadística en el proceso, la concentración de  $H_2O_2$ . El modelo de predicción fue establecido. A condiciones de  $F = 200$  ml/min,  $C = 90$  mg/L y  $V = 300$  rpm, se logró 52.65 % de reducción de turbidez, 83.9% de materia orgánica total y 72.97% de materia orgánica biodegradable en un tiempo de 112.5 min, situación en la cual la muestra cumple eficientemente con la norma establecida para efluentes no domésticos; constituyendo una alternativa para el tratamiento de aguas con alta carga orgánica contaminante.

**Palabras Clave**— efluente de matadero, peróxido de hidrógeno, oxidación avanzada, reactor batch, turbidez

**Abstract**—The wastewater generated in the processing of chicken meat contains a high turbidity due to the presence of suspended solids, organic matter, coliforms, lipids and others. The present work evaluates the  $H_2O_2$  oxidation process of the “Granja Quispe” slaughterhouse wastewater, with a batch bubbling reactor integrated with an airflow, stirrer, and temperature control system; and automated data acquisition for turbidity and pH, implemented with a micro-controller Arduino. The decrease of turbidity with the airflow (F), stirring velocity (V) and  $H_2O_2$  concentration (C) is studied using a  $2^3$  multilevel factorial experimental design. The results show that the higher F, V and C, the greater the decrease in turbidity; being the variable with the greatest effect and statistical significance in the process, the concentration of  $H_2O_2$  and an empirical model was established. At conditions of  $F = 200$  ml / min,  $C = 90$  mg / L and  $V = 300$  rpm, it was possible to decrease 52.65% of turbidity, 83.9% of total organic matter and 72.97% of biodegradable organic matter in a time of 112.5 min, conditions at which the sample efficiently complies with the established standard for non-domestic effluents; constituting an alternative for the treatment of water with a high organic pollutant load.

**Keywords**—slaughterhouse effluent, hydrogen peroxide, advanced oxidation, batch reactor, turbidity

## I. INTRODUCCIÓN

La industria de procesamiento de carnes genera efluentes con alta carga de materia orgánica biodegradable como sangre, grasas, sólidos suspendidos, sales etc., generando un impacto ambiental significativo debido a los altos niveles de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y demanda química de oxígeno (DQO) [1], convirtiéndose en una de las industrias altamente contaminantes. Aproximadamente el 24% del consumo de agua destinado al sector alimentario corresponde al procesamiento cárnico [2].

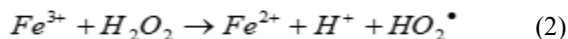
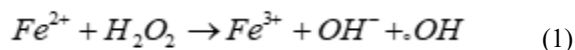
Procesos aerobios y anaerobios son tradicionalmente utilizados para el tratamiento de aguas con alto contenido de materia orgánica; sin embargo, el primer proceso se encuentra limitado por el alto consumo de energía en la etapa de aireación y la generación significativa de lodos [3]. En el segundo caso, en el proceso ocurre acumulación de sólidos suspendidos y grasas, reduciendo la actividad metanogénica. Otras tecnologías de tratamiento incluyen la precipitación química, separación por membranas, oxidación, electrocoagulación y bioadsorción [4][5][6][7]. Algunas de ellas reforzadas con nanopartículas como catalizadores[8].

Los procesos de oxidación constituyen una alternativa viable; así el peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) es un oxidante fuerte con poder bactericida y capacidad para reducir la DBO, DQO, color y olor asociado a la presencia de sulfuros en aguas residuales. La ausencia de subproductos (sin formación de compuestos clorados como en técnicas tradicionales de cloración) y su solubilidad da al  $H_2O_2$  las características para ser usado en el pretratamiento o postratamiento de aguas residuales [9]. El  $H_2O_2$  se considera como uno de los reactivos claves en la química verde debido a que sólo se disocia en agua y oxígeno, quedando el agua como subproducto en las reacciones de oxidación [10][11]. Como en la oxidación total se produce  $CO_2$ , una buena agitación, favorece su desprendimiento y también que el medio de reacción en contacto con el aire, se oxigene mejor [12].

Los procesos de oxidación avanzada (POA), definidos como aquellas tecnologías que utilizan radicales hidroxilo ( $\cdot OH$ ) para la mineralización de sustancias contaminantes se han convertido en una interesante alternativa frente a procesos convencionales para el tratamiento de aguas residuales de camal, una de las ventajas más resaltantes es la inactivación de

microorganismos patogénicos y en adición, evitan la generación de coproductos tóxicos [13][14].

Uno de los procesos de oxidación avanzada que considera la mezcla de iones hierro con  $H_2O_2$ , con el fin de producir radicales libres oxidantes ( $\cdot OH$ ), de acuerdo a (1), se denomina Proceso Fenton [15][16].



En adición a los radicales  $\cdot OH$ , [17] y [18] reportan que además se generan radicales per-hidroxiilo, de acuerdo a (2), que promueven una reacción en cadena mejorando la eficiencia del proceso de mineralización de la carga orgánica.

En [16], afirman que la cantidad de peróxido y compuestos de hierro a utilizar depende de la caracterización fisicoquímica del efluente y la cinética de degradación es afectada positivamente por la concentración de los reactantes y catalizador, es decir  $H_2O_2$  y  $Fe^{2+}$ . Sin embargo, esta relación no es monótonica y concentraciones altas de oxidante promueven reacciones secundarias que inhiben el proceso.

A pesar de que el proceso Fenton puede ocurrir a temperatura ambiente, un aumento de ésta favorece la cinética de reacción. Sin embargo, se debe considerar que el peróxido de hidrógeno es inestable a altas temperaturas [19].

El control del pH es crítico en el mecanismo de reacción Fenton. Previos trabajos reportaron una mayor eficiencia en un rango de pH ácido menor a 4 y mayor a 2 [20][21][22]. En entornos de pH muy ácido o muy alcalino la cinética de reacción del proceso de mineralización se ve afectada negativamente. Si se realiza un incremento en el valor del pH conduce a la precipitación del hierro como  $Fe(OH)_3$  y de esta manera la reacción no se lleva a cabo viéndose afectada la regeneración de  $Fe^{2+}$ . En [19], reportaron que a condiciones de pH muy ácidas se promueve la generación del reactivo  $[Fe(H_2O)_6]^{2+}$ , que reacciona selectivamente con el  $H_2O_2$  impidiendo la formación de radicales  $\cdot OH$ . En adición, condiciones de acidez extrema inhiben el proceso de recuperación del catalizador, debido a la estabilización de los iones oxonio ( $H_3O_2^+$ ) [19]. En cuanto al tiempo de residencia, desde un punto de vista económico, operar con altos tiempos de residencia no es viable [15]; así, con bajos períodos de reacción se consiguen buenos niveles de degradación de contaminantes en comparación con otros procesos de oxidación química [23].

La aplicación del proceso Fenton conlleva al control de parámetros críticos para un correcto funcionamiento, como tipo de catalizador y concentración, concentración relativa de reactivos y contaminante, pH, temperatura y agitación [12] [19].

La sangre es el primero de los subgrupos que se obtiene con el sacrificio de los animales en los mataderos o canales y posee una composición química compleja, destacándose el contenido de proteínas, dentro de ellas la ferritina que en la

sangre de pollo contiene en promedio 42.9 mg Fe/100 g de sangre [24].

El presente trabajo, evaluó el tratamiento de aguas contaminadas con sangre de pollo, mediante un proceso combinado de oxidación con peróxido de hidrógeno e inyección de aire, en un reactor batch de burbujeo, con control de temperatura y agitación empleando un sistema de adquisición de datos autónomo de turbidimetría y pH.

## II. MATERIALES Y METODOS

### A. Agua residual del matadero avícola

Las muestras estuvieron constituidas por efluentes del lavado de las aves evisceradas (sanguaza) del matadero avícola "Granja Quispe", ubicada en la ciudad de Cusco - Perú. Se tomaron muestras compuestas en el mismo punto, en un volumen de 3 L para cada experimento. Las muestras simples (Fig. 1), fueron de igual volumen (500 ml), tomadas cada hora durante seis horas. La preservación y análisis se realizaron, de acuerdo a métodos estandarizados [25]. Los parámetros analizados fueron DQO, DBO, nitrógeno total, fósforo total, sólidos solubles totales, turbiedad y pH, en consideración a la norma establecida [26].



Fig. 1 Muestras simples de efluentes del matadero "Granja Quispe"

### B. Equipos y reactivos

Equipos: Reactor de burbujeo con control de temperatura y adquisición de datos autónoma, Equipo multiparamétrico de mesa (Wtw multi 9630 Ids, Alemania), reactor DQO (TR 320, MERCK, Alemania), termostato de encendido/apagado serie XH-W3001 y sensores de pH con conector BNC (SKU: SEN0161), turbidez (SKU: SEN0189) y agitación compatible para Arduino.

Reactivos: Peróxido de hidrogeno al 35% (MERCK, Alemania), Ácido sulfúrico al 98% p.a (MERCK, Alemania).

### C. Montaje del reactor batch de burbujeo

En los experimentos de oxidación se usó un reactor batch de 7 L de capacidad (volumen de operación de 2.5 L), con un sistema de control de temperatura, entre 20 y 25°C [27] y sistemas de control y de adquisición de datos de turbiedad, velocidad de agitación y pH mediante microcontroladores Arduino. La Fig. 2 muestra el diagrama del reactor con sus componentes electrónicos.

Se utilizaron dos microcontroladores (modelo Arduino) en configuración esclavo (01 y 02) y un controlador Mega Maestro, los cuales se sincronizaron mediante un protocolo I<sup>2</sup>C. El algoritmo para el sistema, se desarrolló en lenguaje C++. El esclavo 02 tuvo la función de leer datos de los sensores de turbidez y pH y enviar señales al panel de control

maestro. Por otro lado, el esclavo 01 se encargó de recibir señales de ON/OFF y el control de agitación del reactor.

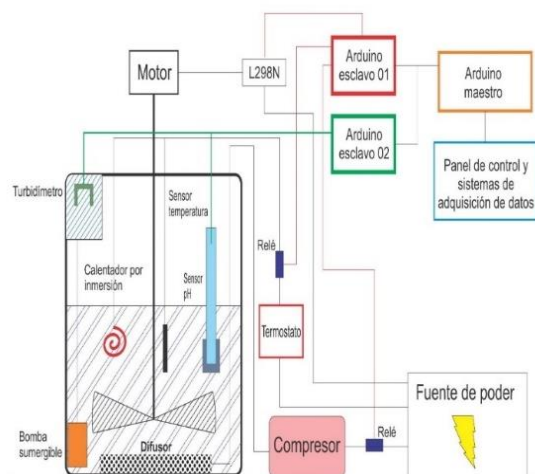


Fig. 2 Reactor batch con sensores y sistemas de control

En la Fig. 3 se visualiza el circuito electrónico con la implementación del protocolo I<sup>2</sup>C.

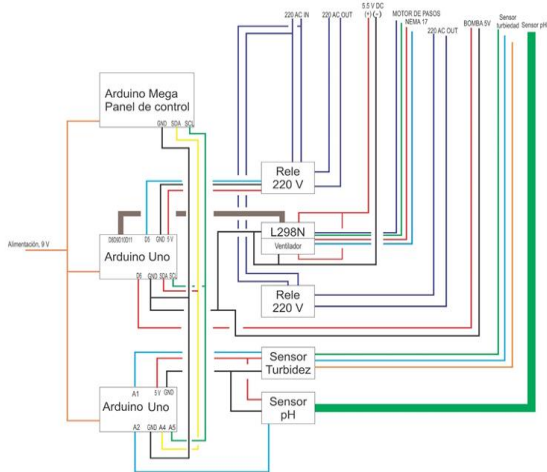


Fig.3 Configuración I<sup>2</sup>C para el reactor batch de burbujeo

#### D. Procedimiento experimental

El proceso se inició con la remoción de sólidos gruesos y seguidamente la alimentación al reactor batch de 2.5 L de muestra, a condiciones controladas de temperatura entre 20 a 25 °C, presión atmosférica (520.5 mm Hg) y monitoreo de pH, turbiedad y tiempo. Los experimentos se desarrollaron a diferentes condiciones de flujo de aire (F), velocidad de agitación (V) y concentración de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (C), sobre la variable % de reducción de turbidez (%TUE) en un tiempo (τ) [28]. τ, se define como el tiempo que toma el sistema para alcanzar un valor constante de turbiedad final.

La eficiencia de remoción de materia sólida suspendida presente en la muestra en estudio, como %TUE se calculó conforme a (3).

$$\%TUE = \left( \frac{TU_i - TU}{TUi} \right) \times 100 \quad (3)$$

Donde: TUi y TU son las concentraciones de turbiedad inicial y final, respectivamente.

#### E. Diseño experimental

Mediante un diseño experimental factorial 2<sup>3</sup> con punto central y replicas correspondientes, se estudió el efecto de flujo de aire (100 y 200 mL/min), concentración H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (0 y 90 mg/L) y velocidad de agitación (0 y 300 rpm), sobre %TUE. Los niveles seleccionados se basaron en las referencias [28] y [29]. Los resultados se analizaron mediante el método de superficie de respuesta, estableciendo el modelo matemático de predicción y la prueba ANOVA, para determinar la significancia de las variables en estudio. Finalmente se determinaron los parámetros de flujo de aire (F), concentración de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (C) y velocidad de agitación (V) en función al mayor % de remoción de sólidos suspendidos (mayor %TUE en el menor tiempo).

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### A. Caracterización fisicoquímica de la muestra

La Tabla I, presenta la caracterización fisicoquímica promedio de la muestra del efluente del matadero avícola “Granja Quispe”.

TABLA I  
CARACTERIZACION FISICOQUIMICA DE LA MUESTRA.

Parámetro	Valor	Unidad
DQO	199.2 ± 2.0	mg / L
DBO <sub>5</sub>	1036 ± 0.5	mg/ L
Nitrógeno total	120 ± 0.3	mg/ L
Conductividad eléctrica	5110 ± 0.6	uS/ cm
Sólidos solubles totales	3400 ± 3.8	mg/ L
Turbiedad	305 ± 0.4	NTU
pH	7.5 ± 0.2	---

Un examen de los parámetros analizados, indican que DQO, DBO y nitrógeno exceden los Valores Máximos Admisibles (VMA), establecidos en [26], en 992, 536 y 40 mg L<sup>-1</sup> respectivamente; sin embargo el pH se encuentra dentro del rango establecido (de 6 a 9); tal como también lo reportan en [30], donde caracterizaron sanguaza de pescado. En adición, otros trabajos informan pH entre 6.4 y 9.7 para efluentes provenientes de mataderos [31][32]. La razón estriba en que la sangre constituye un sistema buffer, tal como se sustenta en [33]. Para el caso de la turbidez, los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) [34] exigen 100 NTU, para las categorías 1-A y 1-B, por tanto superan en 205 unidades; no obstante se indican valores superiores para efluentes provenientes de mataderos avícolas entre 550 y 600 NTU [35], que se relaciona con la presencia de sólidos en suspensión orgánicos e inorgánicos con aptitudes de adsorción de metales pesados y compuestos orgánicos contaminantes; por tanto deben ser removidos.

Respecto a la conductividad, sobrepasan los ECA, para la categoría 3 (agua para riego de vegetales y bebida de animales)



[34] y los sólidos solubles totales constituyen indicadores de color y presencia de sales.

El grado de biodegradabilidad de la muestra (DBO/DQO), fue de 0.52, que la caracteriza como parcialmente biodegradable; lo que sustenta su tratamiento con métodos de oxidación entre otros.

*B. Proceso de oxidación, modelación y determinación de parámetros*

La Tabla II, muestra los valores de turbidez promedio finales (TU), tiempo de estabilización ( $\tau$ ) y %TUE, para las diferentes condiciones experimentales.

TABLA II  
RESULTADOS DE PRUEBAS EXPERIMENTALES

N°	Variables de entrada			TU <sub>i</sub>	TU	$\tau$	Variable de salida %TUE
	F	C	V				
1	100	0	0	307.1	287.5	205.0	6.38
2	100	90	0	309.3	156.5	195.5	49.40
3	200	0	0	306.3	280.0	167.0	8.58
4	200	90	0	301.8	159.0	171.0	47.31
5	100	0	300	321.4	281.5	174.0	12.41
6	100	90	300	310.7	154.0	181.5	50.43
7	200	0	300	315.2	276.5	143.0	12.28
8	200	90	300	316.8	150.0	112.5	52.65
9	150	45	150	316.1	186.5	134.0	40.99

F: flujo de aire (ml/min), C: concentración de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (mg/L), V: velocidad de agitación (rpm), TU<sub>i</sub>: turbidez inicial (NTU), TU: turbidez final (NTU), %TUE: % reducción de turbidez  $\tau$ : tiempo de estabilización (min).

Los resultados muestran tres escenarios resaltantes. El primero que consideró el tratamiento con solo aireación, con flujo (F) de 100 ml/min (sin H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y agitación), requirió mayor tiempo de estabilización (205 min) y se alcanzó una disminución de turbidez de 6.38%, lo que demuestra que el aire alimentado contribuye en el contenido de oxígeno disuelto en la sanguaza, de acuerdo a la Ley de Henry; tal como se sustenta en la referencia [11] y por ende coadyuva en la oxidación de la materia orgánica.

El segundo escenario se encuentra a valores medios de F, C y V, presentando un 34.61% más de remoción respecto del primer escenario; este hecho demuestra que, para el tratamiento de la sanguaza, es importante el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> como agente oxidante [9] y la agitación, que propicia mayor contacto del oxidante con los sólidos en suspensión [12], alcanzando el 40.99% de disminución turbidez y en menor tiempo de estabilización (134 min). Del análisis de los experimentos, también se puede mencionar que la concentración de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (C) muestra el mayor efecto.

El tercer escenario representa las condiciones (F= 200 ml/min, C= 90 mg/l, y V= 300 rpm) a las cuales se logra la mayor disminución de turbidez y en menor tiempo (112.5 min), que supera la performance del segundo escenario en

11.66% y aún en menor tiempo. Estos resultados sugieren que probablemente el Fe presente en la sangre (como ferritina), haya actuado como catalizador en la generación de iones  $\cdot\text{OH}$  y producido una mayor oxidación, tal como lo sustenta el Proceso Fenton [15][16]. Asimismo, sin considerar la presencia de Fe, el mecanismo de oxidación se explicaría por la disociación del H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, provocando un incremento de O<sub>2</sub> disuelto que coadyuva el proceso de oxidación, tal como lo mencionan en [10][11]. Por otro lado, a mayor velocidad de agitación y flujo de aire al sistema, también se provee mayor cantidad de O<sub>2</sub> disuelto y por ende mayor oxidación de la materia orgánica.

La Fig. 4, muestra las superficies respuesta para %TUE, la primera en función de la concentración H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (C) y flujo de aire (F) y la segunda en función de la concentración H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (C) y velocidad de agitación (V); donde las zonas rojas y azules representan zonas de mayor y menor %TUE respectivamente.

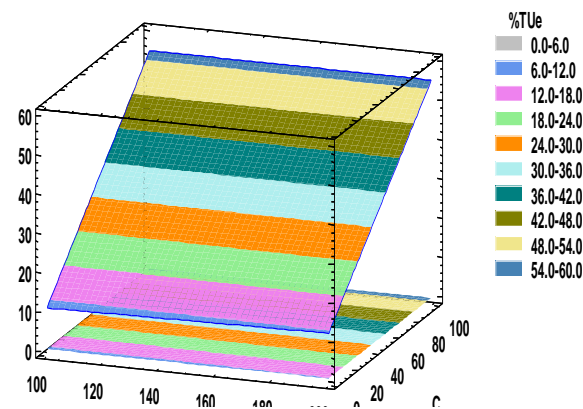
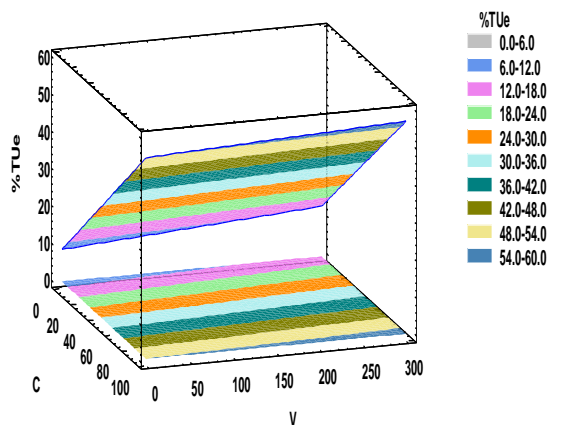


Fig. 4: Superficies de respuesta para % reducción de turbidez (%TUE)

Como se aprecia, se obtienen mayores %TUE a mayores concentraciones de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (C), no mostrando influencia la variación del flujo de aire (F), y mínima influencia la velocidad de agitación (V); tal como se comprobó en los experimentos a diferentes V, donde no ocurrió variación de

color significativo. Al respecto [36] reportó que la eficiencia de remoción de sulfadimetoxina, mediante el proceso Fenton se incrementa de 88.1 %, 94.4% y 96.2% para velocidades de agitación de 80, 100 y 120 rpm, respectivamente.

Por otro lado, la zonas de menor %TUE se dan a concentraciones de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> por debajo de 20 mg/l; esto concuerda con lo informado en [37], quienes estudiaron el efecto del H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en la eliminación de color en aguas residuales.

La Tabla III, resume los resultados de la prueba ANOVA para %TUE, donde se puede observar que la variable más significativa o de mayor influencia en la reducción de turbidez en las muestras tratadas, es la concentración de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (C) (p valor < 0.05); por tanto, es diferente de cero al 95% de confianza.

TABLA III  
PRUEBA ANOVA PARA %TUE

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:F	0.605	1	0.605	0.01	0.9274
B:C	3205.6	1	3205.6	56.12	0.0174
C:V	32.4013	1	32.4013	0.57	0.5299
AB	0.47045	1	0.47045	0.01	0.9360
AC	0.49005	1	0.49005	0.01	0.9346
BC	1.4112	1	1.4112	0.02	0.8895
Error total	114.243	2	57.1216		
	3355.22	8			

Este resultado se corrobora a través del Diagrama de Pareto (Fig. 5) donde se muestra el efecto directo de las variables C, V y F sobre %TUE: destacándose claramente el mayor efecto de C, que se interpreta que a mayor concentración de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, mayor disminución de la turbidez.

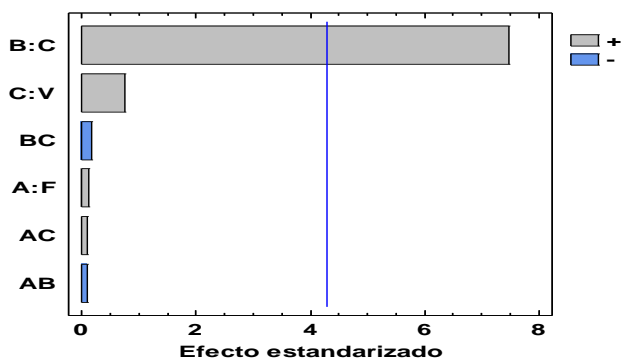


Fig. 5 Efecto de la concentración H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (C), velocidad de agitación (V) y Flujo de aire (F) sobre % disminución de la turbidez (%TUE)

El modelo de regresión lineal, que ajusta los datos experimentales en 96.5% (R<sup>2</sup>= 0.965), mostrando bondad de ajuste está representado mediante (4).

$$\%TUE = 8.3039 + 0.0055F + 0.4448C + 0.0134V \quad (4)$$

El modelo matemático que considera solo la variable significativa (5), muestra una bondad de ajuste del 95.54%,

quedando también validada para predecir %TUE para diferentes concentraciones de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (C), dentro del rango de experimentación.

$$\%TUE = 11.1414 + 0.44448C \quad (5)$$

La Fig. 6 exhibe la variación del pH respecto al tiempo para los experimentos 8 y 9. La disminución del pH en todos los escenarios se puede explicar debido a que la oxidación de materia orgánica produce CO<sub>2</sub>, el cual se disuelve en las muestras en tratamiento formando H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, que provoca disminución del pH y favorece el proceso de oxidación. A condiciones de mayores C, F y V, se propicia mayor presencia de O<sub>2</sub> disuelto, por ende mayor oxidación, concentración creciente de H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> y gradiente de pH mayor [38]. En esta situación se genera mayor área de contacto aire-agua [39], mejores condiciones aeróbicas por la disociación de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> [11] y menor cantidad de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> residual, lo que favorece el proceso.

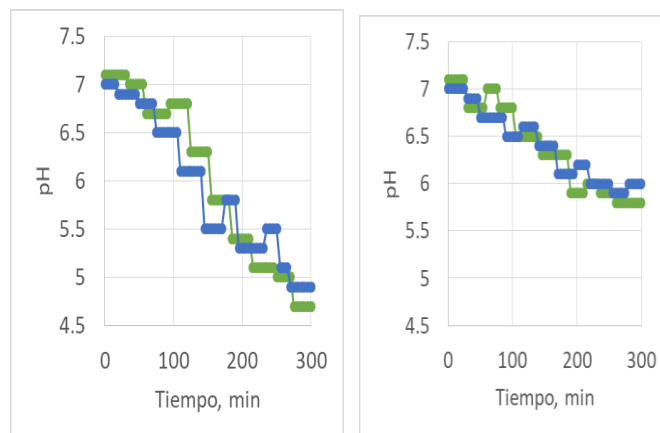


Fig. 6 Comportamiento del pH función del tiempo para los experimentos 8 y 9

A valores de F = 200ml/min, C= 90 mg/L y V=300 rpm, se alcanzó mayor reducción de turbidez (52.65%), y menor tiempo de estabilización (112.5 min.) constituyéndose, estos valores en parámetros del proceso. A estas condiciones la caracterización de la muestra antes y después del tratamiento se resume en la Tabla IV.

Los resultados indican que el tratamiento resultó adecuado, por cuanto la muestra cumple en forma satisfactoria con los Valores Máximos Admisibles estipulados en la norma [26], referido a los parámetros de DBO, DQO, pH y nitrógeno total. Así se logró remover el 72.97 % DBO, 83.9 % DQO y 93.5% de nitrógeno total. Si bien, la norma no contempla el parámetro de turbidez; su determinación es importante para medir el grado de remoción de sólidos en suspensión de naturaleza orgánica e inorgánica presentes en los efluentes de mataderos. Respecto a la conductividad eléctrica y sólidos solubles totales, los valores de la muestra se encuentran por debajo de los estándares de calidad de agua y límites estipulados para agua potable [34].

TABLA IV  
CARACTERIZACION FISICOQUIMICA DEL AGUA TRATADA

Parámetro	Muestra sin tratar	Muestra tratada	Norma
DBO, mg/L	1036 ± 0.7	280 ± 0.8	500 (VMA)
DQO, mg/L	1992 ± 2.0	320 ± 2.5	1000 (VMA)
Sólidos solubles totales, mg/L	3400 ± 3.8	2,5 ± 4.2	
Nitrógeno total, mg/L	120 ± 0.3	7,8 ± 0.6	100 (VMA)
pH	7,5 ± 0.2	8,5 ± 0.2	6 a 9 (VMA)
Turbiedad, NTU	305 ± 0.4	150 ± 0.2	100 (ECA)
Conductividad, uS/cm	5110 ± 0.6	2,16 ± 0.4	2500 (ECA)

En comparación, los resultados obtenidos superan la performance de otros tratamientos en la disminución de DQO, reportados en [31][40]; donde se trataron efluentes de mataderos mediante flotación por aire disuelto y efluentes del proceso de producción de aceite de oliva mediante una combinación de ultrasonido, radiación UV y TiO<sub>2</sub> como catalizador, respectivamente. Por otro lado, han sido informadas mayores remociones de materia orgánica de efluentes de la industrias de papel y de pigmentos [4] mediante oxidación anódica con electrodos de diamante y de aguas residuales de mataderos [8] tratadas mediante oxidación foto catalítica usando peróxido de hidrógeno con nanopartículas de TiO<sub>2</sub>-Ag; ambas investigaciones sustentan que la producción de ·OH es más eficiente, lo que acelera la degradación (mineralización) de la materia orgánica.

#### IV. CONCLUSIONES

El tratamiento de los efluentes del matadero “Granja Quispe”, por oxidación con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en un reactor batch de burbujeo, con sistemas de control y de adquisición de datos resultó eficiente para el cumplimiento de los Valores Máximos Admisibles exigidos para efluentes no domésticos; lográndose disminuir la turbidez (52.65%) y remover eficientemente la materia orgánica total (83,9%), y biodegradable (72.97%). Las variables flujo de aire, concentración de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y velocidad de agitación se relacionaron en un modelo matemático, mostrando las tres variables influencia directa en la reducción de la turbidez; siendo la más significativa la concentración de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, con lo que se comprueba la efectividad del proceso. Por tanto, este tratamiento constituye una alternativa viable para el tratamiento de aguas residuales con carga orgánica contaminante y su recuperación para reuso.

#### AGRADECIMIENTOS

A la Empresa “Granja Quispe” y la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco-Perú, por facilitar la

ejecución de esta investigación, cuyos resultados serán aplicados a la industria de beneficio de animales de la región Cusco-Perú.

#### REFERENCIAS

- [1] A. C. Marcos, A. Al-Kassir, F. Cuadros, and T. Yusaf, “Treatment of slaughterhouse waste water mixed with serum from lacteal industry of extremadura in Spain to produce clean energy,” *Energies*, vol. 10, no. 6, 2017, doi: 10.3390/en10060765.
- [2] P. W. Gerbens-Leenes, M. M. Mekonnen, and A. Y. Hoekstra, “The water footprint of poultry, pork and beef: A comparative study in different countries and production systems,” *Water Resour. Ind.*, vol. 1–2, pp. 25–36, 2013, doi: 10.1016/j.wri.2013.03.001.
- [3] M. Bayramoglu, M. Eyvaz, and M. Kobya, “Treatment of the textile wastewater by electrocoagulation. Economical evaluation,” *J. Chem. Eng. J.*, vol. 128, pp. 155–161, 2006, doi: 10.1016/j.ccej.2006.10.008.
- [4] A. Kraft, M. Stadelmann, and M. Blaschke, “Anodic oxidation with doped diamond electrodes: A new advanced oxidation process,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 103, no. 3, pp. 247–261, 2003, doi: 10.1016/j.jhazmat.2003.07.006.
- [5] M. Valladares-Cisneros, C. Valerio, P. De la Cruz, and R. M. Melgoza, “Adsorbentes no-convencionales, alternativas sustentables para el tratamiento de aguas residuales,” *Rev. Ing. Univ. Medellín*, vol. 16, no. 31, pp. 55–73, 2017, doi: 10.22395/rium.v16n31a3.
- [6] U. R. Fernández-Bernaola, M. E. Navarro-Clemente, and A. R. Maldonado-Farfán, “Lead adsorption from polluted water using *Opuntia larreyi* cactus,” in *Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology*, 2019, vol. 2019-July, doi: 10.18687/LACCEI2019.1.1.163.
- [7] U. R. Fernandez-Bernaola and A. R. Maldonado-Farfán, “Lead adsorption from polluted water using *Trichocereus cuzcoensis* cactus,” 2020, no. July 2020, pp. 24–26, doi: <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.295>.
- [8] K. Bukhari, N. Ahmad, I. A. Sheikh, and T. M. Akram, “Effects of different parameters on photocatalytic oxidation of slaughterhouse wastewater using TiO<sub>2</sub> and silver-doped TiO<sub>2</sub> nanoparticles,” *Polish J. Environ. Stud.*, vol. 28, no. 3, pp. 1591–1600, 2019, doi: 10.15244/pjoes/90635.
- [9] J. O. Baquero Guayacán, “Oxidación con peróxido de hidrógeno como pulimiento del efluente de la PTAR ‘Pinares’ Castilla la Nueva Meta,” *Repos. Uniandes*, no. 5, p. 29, 2014, [Online]. Available: [https://documentodegrado.uniandes.edu.co/documentos/199123791\\_fecha\\_2014\\_02\\_16\\_hora\\_19\\_16\\_08\\_parte\\_1.pdf](https://documentodegrado.uniandes.edu.co/documentos/199123791_fecha_2014_02_16_hora_19_16_08_parte_1.pdf).
- [10] G. Blanco Viera, *Síntesis directa de peróxido de hidrógeno con catalizadores de paladio sobre soportes ácidos*. Instituto de atálisis y Petroleoquímica, CSIC, 2007.
- [11] H. Casierra-Martínez, J. Casalins\_blanco, Th. X. Vargas-Ramirez, and A. Caselles-Osorio, “Desinfección de agua residual doméstica mediante un sistema de tratamiento acoplado con fines de reúso,” vol. 7, no. 4, pp. 97–111, 2016.
- [12] C. Medina, W. Uriarte, S. Orrego, and E. Montero, “Aplicación del proceso fenton para degradar aguas residuales del camal de Chota,” Chota - Perú, 2018.
- [13] R. F. de Sena, J. L. Tambosi, A. K. Genena, R. de F. P. M. Moreira, H. F. Schröder, and H. J. José, “Treatment of meat industry wastewater using dissolved air flotation and advanced oxidation processes monitored by GC-MS and LC-MS,” *Chem. Eng. J.*, vol.

152, no. 1, pp. 151–157, 2009, doi: 10.1016/j.cej.2009.04.021.

- [14] Y. Deng and R. Zhao, "Advanced Oxidation Processes (AOPs) in Wastewater Treatment," *Curr. Pollut. Reports*, vol. 1, no. 3, pp. 167–176, 2015, doi: 10.1007/s40726-015-0015-z.
- [15] P. Ghosh, A. N. Samanta, and S. Ray, "COD reduction of petrochemical industry wastewater using Fenton's oxidation," *Can. J. Chem. Eng.*, vol. 88, no. 6, pp. 1021–1026, 2010, doi: 10.1002/cjce.20353.
- [16] E. Neyens and J. Baeyens, "A review of classic Fenton's peroxidation as an advanced oxidation technique," *J. Hazard. Mater.*, vol. 98, no. 1–3, pp. 33–50, 2003, doi: 10.1016/S0304-3894(02)00282-0.
- [17] N. Acharya, C. Thakurt, and P. K. Chaudhari, "Dataset on statistical reduction of COD by electrocoagulation process using RSM," *Sci. Direct*, vol. 28, no. 5, pp. 1–6, 2020, doi: doi.org/10.1016/j.dib.2019.104944.
- [18] X. Domènech and W. F. Jardim, *PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACION PARA ELIMINACION DE CONTAMINANTES*. Argentina: CYTED, 2005.
- [19] P. Malíková, J. Hajduková, and L. Nezvalová, "Oxidation of polycyclic aromatic hydrocarbons by Fenton reaction," vol. LV, no. 4, pp. 23–28, 2009.
- [20] A. Durán-Moreno, S. A. García-González, M. R. Gutiérrez-Lara, F. Rigas, and R. M. Ramírez-Zamora, "Assessment of Fenton's reagent and ozonation as pre-treatments for increasing the biodegradability of aqueous diethanolamine solutions from an oil refinery gas sweetening process," *J. Hazard. Mater.*, vol. 186, no. 2–3, pp. 1652–1659, 2011, doi: 10.1016/j.jhazmat.2010.12.043.
- [21] J. J. Pignatello, E. Oliveros, and A. MacKay, "Advanced oxidation processes for organic contaminant destruction based on the fenton reaction and related chemistry," *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, vol. 36, no. 1, pp. 1–84, 2006, doi: 10.1080/10643380500326564.
- [22] X. R. Xu, Z. Y. Zhao, X. Y. Li, and J. D. Gu, "Chemical oxidative degradation of methyl tert-butyl ether in aqueous solution by Fenton's reagent," *Chemosphere*, vol. 55, no. 1, pp. 73–79, 2004, doi: 10.1016/j.chemosphere.2003.11.017.
- [23] A. A. Burbano, D. D. Dionysiou, and M. T. Suidan, "Effect of oxidant-to-substrate ratios on the degradation of MTBE with Fenton reagent," *Water Res.*, vol. 42, no. 12, pp. 3225–3239, 2008, doi: 10.1016/j.watres.2008.04.004.
- [24] C. J. Gonzales and L. L. Valladares, "Formulacion, elaboracion y aceptabilidad del yogurt enriquecido con sangre de pollo para madres gestantes," *Univ. Nac. Jose Faustino Sanchez Carrion*, p. 60, 2017, [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2012.02.007>.
- [25] APHA-AWWA-WEF, "5220 CHEMICAL OXYGEN DEMAND (COD)\* 5220 B . Open Reflux Method," 23rd Ed., no. 5000, 2017, pp. 14–19.
- [26] MVCS, "Decreto Supremo que aprueba el Reglamento de Valores Máximos Admisibles (VMA) para las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario," *El Peru.*, p. 20, 2016, [Online]. Available: <https://busquedas.elperuano.pe/download/url/decreto-supremo-que-aprueba-el-reglamento-de-valores-maximos-decreto-supremo-n-010-2019-vivienda-1748339-3>.
- [27] P. Kundu, A. Debsarkar, and S. Mukherjee, "Treatment of slaughter house wastewater in a sequencing batch reactor: Performance evaluation and biodegradation kinetics," *Biomed Res. Int.*, vol. 2013, 2013, doi: 10.1155/2013/134872.
- [28] C. Bustillo-lecompte and M. Mehrvar, "Slaughterhouse Wastewater : Treatment , Management and Resource Recovery," 2017, doi: <http://dx.doi.org/10.5772/65499>.
- [29] S. Carrasquero, D. Marquina, J. Soto, S. Viloria, M. Pire, and A. Díaz, "Remoción de nutrientes de aguas residuales de una matadero de reses usando un reactor biológico secuencial," *Cienc. e Ing. Neogranadina*, vol. 25, no. 2, pp. 43–60, 2015.
- [30] S. P. Ventura Cueva, "'Tratamiento de sanguaza de pescado del mercado de ancón utilizando micro - nanoburbujas de aire a escala laboratorio,'" *Univ. César Vallejo*, 2017.
- [31] G. Salas and C. Condorhuaman, "Tratamiento De Las Aguas Residuales De Un Centro De Beneficio O Matadero De Ganado," *Rev. Peru. Química e Ing. Química*, vol. 11, no. 1, pp. 29–35, 2008.
- [32] N. Boughou, I. Majdy, E. Cherkaoui, M. Khamar, and A. Nounah, "Effect of pH and time on the treatment by coagulation from slaughterhouse of the city of Rabat," *MATEC Web Conf.*, vol. 149, pp. 2–5, 2018, doi: 10.1051/mateconf/201714902091.
- [33] A. Mendoza, "Funcionamiento e importancia del sistema bicarbonato/CO2 en la regulación del pH sanguíneo," *Cienc. ergo sum*, vol. 15, pp. 155–160, 2008, [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/pdf/104/10415206.pdf>.
- [34] El Peruano, "Decreto Supremo N°015-2015-MINAM Estandares Nacionales de Calidad Ambiental para agua," pp. 569076–569082, 2015.
- [35] M. Kobya, E. Senturk, and M. Bayramoglu, "Treatment of poultry slaughterhouse wastewaters by electrocoagulation," *J. Hazard. Mater.*, vol. 133, no. 1–3, pp. 172–176, 2006, doi: 10.1016/j.jhazmat.2005.10.007.
- [36] J. Wang, X. Zhou, M. G. Waigi, F. O. Gudda, P. Cheng, and W. Ling, "Simultaneous removal of estrogens and antibiotics from livestock manure using fenton oxidation technique," *Catalysts*, vol. 9, no. 8, 2019, doi: 10.3390/catal9080644.
- [37] C. T. Mehmood, A. Batoool, and I. A. Qazi, "Combined Biological and Advanced Oxidation Treatment Processes for COD and Color Removal of Sewage Water," *Int. J. Environ. Sci. Dev.*, no. February 2015, pp. 88–93, 2013, doi: 10.7763/ijesd.2013.v4.311.
- [38] C. F. Bustillo-Lecompte and M. Mehrvar, "Slaughterhouse wastewater characteristics, treatment, and management in the meat processing industry: A review on trends and advances," *Journal of Environmental Management*, vol. 161. Elsevier Ltd, pp. 287–302, 2015, doi: 10.1016/j.jenvman.2015.07.008.
- [39] K. Terasaka, A. Hirabayashi, T. Nishino, S. Fujioka, and D. Kobayashi, "Development of microbubble aerator for waste water treatment using aerobic activated sludge," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 66, no. 14, pp. 3172–3179, 2011, doi: 10.1016/j.ces.2011.02.043.
- [40] A. Al-Bsoul *et al.*, "Optimal conditions for olive mill wastewater treatment using ultrasound and advanced oxidation processes," *Sci. Total Environ.*, vol. 700, p. 134576, 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134576.