

Reducción de la contaminación
**orgánica expresada como
remoción de la Demanda
Química de Oxígeno
(DQO).**



Pretratamiento oxidativo de aguas residuales con carga orgánica procedentes de la ultrafiltración aplicada para fabricar leche deslactosada

Oxidative pretreatment of wastewater with organic load from ultrafiltration applied to manufacture lactose-free milk

RESUMEN

En la obtención de la leche sin lactosa, se tiene como proceso principal la ultrafiltración de la leche, lo que resulta, por un lado, leche sin lactosa (rechazo) y, por otro, la lactosa con agua y sales (permeado). Este último subproducto no es utilizado como materia prima, sino que constituye un efluente que aporta al caudal total de aguas residuales. Esto ha provocado un incremento de la demanda química de oxígeno (DQO) del efluente inicial, afectando a las etapas de tratamiento de los efluentes industriales, siendo la etapa de tratamiento biológico la más afectada, ya que la lactosa convertida en ácido láctico disminuye el pH del sistema, esto lleva a que los microorganismos no realicen una buena degradación.

El siguiente estudio se centró en realizar un pretratamiento del agua residual cargada de lactosa que fue el permeado de la ultrafiltración que logra deslactosar la leche; específicamente, se busca reducir la contaminación orgánica expresada como remoción de la DQO. La metodología empleada en la investigación fue de tipo aplicada, enfoque cuantitativo, diseño experimental. Se utilizó los procesos de oxidación avanzada de Fenton convencional y de ozonización, y se tuvo como objetivo seleccionar aquel proceso que permita la remoción del DQO a valores por debajo de 3 000 mg/L, para que así pueda pasar a la planta de lodos activados ya existente y puedan ser soportados por los microorganismos dichos niveles de DBO.

Los resultados obtenidos para ambas pruebas realizadas en los laboratorios de Tecsup n.º 1, aplicando el método de oxidación avanzada Fenton, dieron como resultado la remoción máxima de 64 % para Fenton y 39 % para la ozonización, pero esto no fue suficiente debido a la gran estabilidad del disacárido en dosis bajas y una oxidación completa a dosis altas formando productos intermedios solubles que son difíciles de remover en el proceso posterior de coagulación y floculación. Además, el tiempo necesario para oxidar a la lactosa, a productos intermedios

insolubles, es de 30 minutos con la dosis de 1196 mg/L de H_2O_2 , 2000 mg/L de $FeSO_4$ y a pH igual a 3. Esta prueba llegó a reducir gran parte de la materia orgánica, hasta 7280 mg/L DQO, mas no se logró obtener la remoción objetivo de reducir el DQO hasta 3000 mg/L, pero la reducción lograda puede ser mezclada con cierta corriente de agua ya tratada que recircule al reactor y así pueda proceder el tratamiento biológico; esto último ya sería un estudio que haría la compañía de lácteos.

ABSTRACT

The main process used in obtaining lactose-free milk is ultrafiltration, which results in lactose-free milk (retentate) on one side, and lactose with water and salts (permeate) on the other. This last by-product is not used as raw material, but constitutes an effluent that contributes to the total flow of wastewater. This has caused an increase in the chemical oxygen demand (COD) of the initial effluent, affecting the treatment stages of industrial effluents, with the biological treatment stage being the most affected, since the lactose converted into lactic acid decreases the pH of the system, this leads to the microorganisms not carrying out a good degradation.

The following study focused on pretreatment of the lactose-laden wastewater that was the permeate of the ultrafiltration that manages to de-lactose the milk, specifically seeking to reduce organic contamination expressed as removal of COD. The methodology used in the research was applied, quantitative approach, experimental design; where the conventional Fenton advanced oxidation and ozonation processes were used, and the objective was to select that process that allows the removal of COD at values below 3,000 mg/L, so that it can be passed to the production plant activated sludge that already exists and can be supported by the microorganisms at these BOD levels.



Palabras Claves

Tratamiento de aguas residuales, VMA, DQO, pH, dosis, proceso Fenton, oxidación avanzada, ozonificación, lactosa.

Key words

Wastewater treatment, VMA, COD, pH, dose, Fenton Process, Advanced oxidation, ozonation, lactose.

The results obtained for both tests carried out in the TECSUP No. 1 laboratories, applying the Fenton advanced oxidation method, resulted in the maximum removal of 64 % for Fenton and 39 % for ozonation, but this was not enough due to the great stability of the disaccharide at low doses and complete oxidation at high doses forming soluble intermediate products that are difficult to remove in the subsequent coagulation and flocculation process. Furthermore, the time necessary to oxidize lactose, to insoluble intermediate products, is 30 minutes with the dose of 1196 mg/L of H₂O₂, 2000 mg/L of FeSO₄ and at pH equal to 3. This test successfully reduced much of the organic matter, down to 7,280 mg/L COD, but the target removal of reducing COD to 3,000 mg/L was not achieved. However, the reduction obtained could be mixed with a certain flow of already treated water circulating back into the reactor, allowing the biological treatment to proceed. This latter step would be a study conducted by the dairy company.

INTRODUCCIÓN

El presente estudio tiene como objetivo desarrollar un pretratamiento oxidativo adecuado y viable para las aguas residuales generadas por la ultrafiltración en la producción de leche deslactosada, de modo que puedan ser tratadas en una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR).

En la empresa de productos lácteos, la actividad industrial ha aumentado tras el lanzamiento de un nuevo producto de leche sin lactosa, que se obtiene mediante un proceso de ultrafiltración que elimina la lactosa, conservando los otros componentes de la leche (proteínas, vitaminas y minerales). El subproducto extraído, la lactosa, se trata como desecho en la planta de tratamiento de efluentes industriales. Estos residuos líquidos han incrementado con el aumento de la producción, generando aguas residuales con concentraciones de 3000 mg/L, mientras que el efluente de la ultrafiltración presenta hasta 20 000 mg/L.

La alta carga orgánica, debido a la presencia de lactosa, ha afectado significativamente el efluente. Así, la calidad del agua al final del tratamiento no cumple la normativa vigente, ya que la turbiedad excede el límite máximo permisible (LMP). Los sistemas de tratamiento secundarios actuales, basados en microorganismos, no resultan suficientes ni eficaces para el tratamiento del permeado de ultrafiltración, compuesto en su mayoría por lactosa, ácido láctico y otros compuestos orgánicos (incluidas pequeñas partículas coloidales). Esta baja eficiencia se debe a que, al consumir lactosa, las enzimas bacterianas, como la lactasa, producen ácido láctico, lo que reduce el pH hasta aproximadamente 5 en el tratamiento biológico, disminuyendo la actividad de los microorganismos, que funcionan óptimamente a valores de pH entre 5,8 y 9. Esto genera una baja eficiencia en la degradación de la materia orgánica.

Además, el tratamiento fisicoquímico (primario) presenta baja retención, dado que entre el 80 y el 85 % de la materia orgánica biodegradable se encuentra disuelta, lo que limita la acción del coagulante en este efluente.

En conclusión, la planta de tratamiento no está preparada para recibir un efluente de estas características. Por ello, la presente investigación tiene como finalidad encontrar una solución de pretratamiento para dichos efluentes antes de su ingreso al tratamiento biológico junto con otros efluentes de carga orgánica.

Los objetivos del presente estudio son los siguientes:

Objetivo general:

- Evaluar un pretratamiento oxidativo técnicamente viable para las aguas residuales generadas por la ultrafiltración en la producción de leche deslactosada, que se destinarán al tratamiento biológico en la planta de tratamiento.

Objetivos específicos:

- Caracterizar el agua residual mediante análisis fisicoquímicos: conductividad, pH, sólidos totales, sólidos suspendidos y sólidos disueltos.
- Evaluar el agua residual usando la demanda química de oxígeno (DQO) y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO).
- Aplicar diversos tratamientos oxidativos al agua residual para maximizar la remoción de DQO y facilitar su ingreso a la PTAR.
- Identificar la tecnología de tratamiento de agua residual más eficiente para alcanzar la remoción de DQO necesaria, permitiendo derivar el efluente al reactor biológico.

FUNDAMENTOS

Antecedentes

La industria láctea es una de las más contaminantes, ya que genera una alta carga de desechos líquidos que incluyen grasas, proteínas, residuos de lavados de tanques, azúcares, entre otros. Si estos desechos se vierten directamente, pueden causar graves daños en los cuerpos receptores. Por ello, el vertido del efluente tratado industrial hacia un cuerpo receptor es controlado y monitoreado por la Organización de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA), que verifica el cumplimiento de los límites máximos permisibles (LMP).

La incorporación del permeado de leche, obtenido por ultrafiltración, en la planta de tratamiento de efluentes industriales ha generado dificultades en el resultado del efluente tratado. Los altos niveles de azúcares en este permeado, principalmente lactosa, dificultan el tratamiento, ya que el permeado presenta una DBO (demanda bioquímica de oxígeno) entre 3000 y 4500 mg/L [15].

Además, el permeado de leche por ultrafiltración representa un problema ambiental debido a su alta carga orgánica, mayormente de lactosa, por lo que no puede descargarse en cuerpos de agua sin un tratamiento previo [14].

La lactosa, que representa alrededor del 88 % del permeado en la producción de leche deslactosada, constituye una carga orgánica elevada. Por ello, se propone un pretratamiento de la lactosa mediante procesos avanzados de oxidación, como la ozonización y el método de Fenton convencional, como alternativas para su degradación.

Tabla 1
LMP según la normativa ambiental D. S. N°003-2010 Ministerio de Ambiente

Parámetro	Unidad	LMP de efluentes para vertidos a cuerpo de aguas
Aceites y grasas	mg/L	20
Coliformes termotolerantes	NMP/100 mL	10 000
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L	100
Demanda química de oxígeno	mg/L	200
pH	Unidad	6,5 – 8,5
Sólidos totales en suspensión	mg/L	150
Temperatura	°C	<35

Fuente: [12].

Características fisicoquímicas y biológicas del efluente lácteo

A. Sólidos disueltos (SDT): Pequeñas partículas de ciertos materiales en aguas residuales pueden disolverse, como la sal en el agua. Algunos materiales disueltos son consumidos por microorganismos, pero otros, como los metales pesados, son difíciles de eliminar con tratamiento convencional. Cantidades excesivas de sólidos disueltos en las aguas residuales pueden tener efectos adversos en el medio ambiente [13].

B. Sólidos suspendidos (SST): Materiales que resisten la sedimentación y permanecen suspendidos en las aguas residuales. Estos sólidos deben tratarse, ya que obstruyen los sistemas de absorción del suelo o reducen la efectividad de los sistemas de desinfección [13].

C. Turbidez: Se refiere a aguas que contienen materia suspendida que interfiere con el paso de la luz o limita la profundidad visual. [8] La turbidez se mide en NTU (unidad nefelométrica de turbidez).

D. Conductividad: Expresión numérica de la capacidad de una solución para conducir corriente eléctrica, que depende de la presencia de iones y de su concentración, movilidad, carga y temperatura [3].

E. pH: La acidez o alcalinidad de las aguas residuales afecta tanto al tratamiento como al medio ambiente. El pH debe mantenerse entre 6 y 9 para proteger a los organismos, ya que los ácidos y otras sustancias que lo alteran pueden inactivar los procesos de tratamiento [13].

F. Temperatura: Indicador de la calidad del agua que influye en otros parámetros, como el pH, el déficit de oxígeno, la conductividad eléctrica y otras variables fisicoquímicas [5].

G. Demanda bioquímica de oxígeno: Mide la capacidad de las bacterias para digerir materia orgánica en un período de incubación de 5 días a 20 °C, analizando la disminución de oxígeno. Este parámetro cuantifica la materia orgánica biodegradable y se expresa en mg/L [9].

El valor de la DQO (demanda química de oxígeno) siempre será superior al de la DBO, ya que muchas sustancias orgánicas pueden oxidarse químicamente, pero no biológicamente.

Las relaciones entre DQO y DBO permiten determinar el tipo de contaminación:

- Si la relación DBO/DQO es menor de 0,2, se trata de vertidos de naturaleza industrial y poco biodegradables, por lo que conviene aplicar tratamientos fisicoquímicos.
 - Si la relación DBO/DQO está entre 0,20 y 0,50, se recomienda un tratamiento combinado o solo con sistema biológico. En este caso, es importante considerar el área disponible, la inversión y los costos operativos para decidir la técnica de tratamiento.
 - Si la relación DBO/DQO es mayor de 0,60, el vertido es más biodegradable y puede tratarse mediante tratamientos biológicos.
- H. Demanda química de oxígeno (DQO):** Mide la capacidad de una solución de dicromato de potasio caliente para oxidar la materia orgánica, incluyendo tanto la biodegradable como la refractaria (no biodegradable). Se expresa en mg/L [9].

Química de la lactosa

La lactosa es un disacárido exclusivo de las leches, incluida la humana, compuesto por una molécula de glucosa y una de galactosa. Al conservar el grupo aldehído de la galactosa, actúa como un azúcar reductor.

A. Características fisicoquímicas de la lactosa

La lactosa, el principal carbohidrato en la leche de la mayoría de las especies, también se conoce como «el azúcar de la leche». La leche contiene aproximadamente entre 45 y 50 gramos de lactosa por litro. Este componente es el más vulnerable al ataque de microorganismos, transformándose principalmente en ácido láctico y en otros ácidos alifáticos [2].

B. Propiedades químicas de la lactosa

- **Propiedades reductoras:** La lactosa es un azúcar reductor porque contiene un grupo aldehído libre. Esto se puede comprobar mediante la prueba de Fehling, en la cual se observa una reducción parcial del licor cuproalcalino de Fehling.
- **Hidrólisis química:** La hidrólisis de la lactosa es difícil debido a su estabilidad frente a agentes químicos. Sin embargo, puede descomponerse mediante ácidos fuertes en caliente o con la enzima lactasa [2].
- **Degradación térmica de la lactosa:** Entre 110 °C y 130 °C, la lactosa pierde agua, a 150 °C se torna amarilla y a 175 °C se carameliza, oscureciéndose por completo. Algunas levaduras pueden producir lactasa.

Posibles soluciones

Debido al efecto de la lactosa en la disminución del pH, es necesario tratar los residuos de ultrafiltración mediante etapas adicionales que eliminen o transformen la lactosa en compuestos más fáciles y rápidos de procesar. Se proponen los procesos de oxidación avanzada (POA) como una alternativa, seguida de coagulación y floculación.

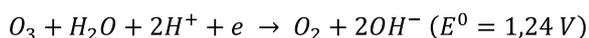
Método de oxidación con ozono

El ozono es un agente altamente oxidante que se emplea en el tratamiento de aguas residuales para el control de olores, la oxidación de contaminantes orgánicos e inorgánicos y la desinfección de efluentes. Es un gas muy inestable y poco soluble en agua, que se produce a partir de moléculas de oxígeno mediante descarga eléctrica o radiación ultravioleta (UV). Sus reacciones en el sistema acuoso son complejas, ya que implican transferencia de masa gas-líquido, autodescomposición y reacciones con compuestos inorgánicos y orgánicos suspendidos o disueltos [11].

Cuando el ozono se disuelve en agua, actúa como un agente altamente oxidante con un potencial de reducción estándar de 2,07 V. Reacciona con componentes orgánicos e inorgánicos presentes en la solución a través de dos vías principales: como ozono molecular (directo) y mediante radicales hidroxilo (indirecto). Las reacciones directas son más selectivas, mientras que las de los radicales hidroxilo constituyen una oxidación avanzada.

Las reacciones del ozono molecular en solución acuosa se clasifican en tres categorías: oxidación-reducción, cicloadición dipolar y sustitución electrofílica. El ozono puede oxidar numerosos compuestos, como hierro, manganeso, sulfuro y bromuro, a través de reacciones de oxidación-reducción [4].

Las principales reacciones son las siguientes:

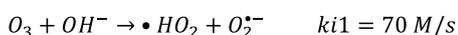


Se sabe que el ozono ataca los dobles enlaces (C=C) en moléculas orgánicas, como olefinas y compuestos aromáticos, formando un intermediario cíclico llamado ozónido, que luego sufre reacciones de ozonólisis anormal y produce moléculas más pequeñas, como cetonas, aldehídos o ácidos carboxílicos [10].

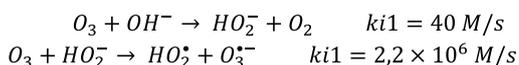
Además de estas reacciones directas entre ozono y compuestos contaminantes en el tratamiento de aguas residuales, las moléculas de ozono se descomponen en varios productos radicales que reaccionan con los contaminantes del efluente. Este proceso genera radicales libres, como el radical hidroxilo (OH·).

Existen dos reacciones principales de iniciación, cuya ocurrencia depende del pH del medio en el que se produce la reacción.

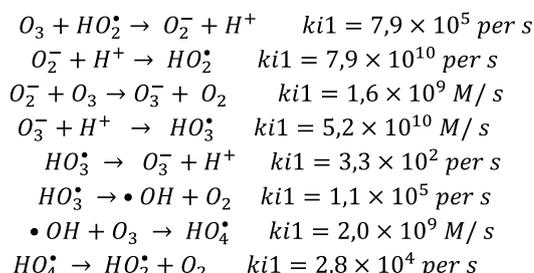
pH ácido a neutro:



pH alcalino:



Normalmente, estas reacciones de iniciación avanzan de manera limitada debido a la lentitud de las reacciones entre las moléculas de ozono y el ion hidroxilo (OH·). Sin embargo, en condiciones alcalinas, el ion hidroperóxido (HO₂⁻) reacciona con otra molécula de ozono más rápidamente que en las reacciones anteriores, produciendo un radical hidroperóxido (HO₂[•]), que luego se descompone en otro radical libre. Esto permite que las reacciones en cadena se extiendan, como:



Así lo mismo, se afirma que, en condiciones alcalinas, se genera el peróxido de hidrógeno (H₂O₂) que es mencionada por las siguientes reacciones:



El peróxido de hidrógeno es, en realidad, un precursor y catalizador en la descomposición del ozono, siendo la base del proceso de oxidación avanzada (POA) de (O₃/H₂O₂), que genera radicales hidroxilo. Este radical tiene un potencial de oxidación superior (2,8 V) al del ozono molecular y puede atacar compuestos orgánicos e inorgánicos de forma no selectiva, con tasas de reacción muy elevadas [1].

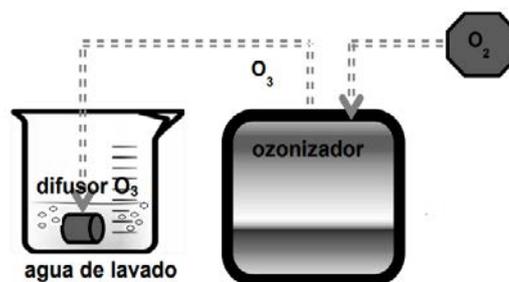


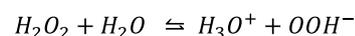
Figura 1. Proceso de oxidación de la lactosa con el ozono

Fuente: [1].

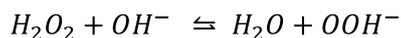
Método de Fenton convencional (Fe/H₂O₂)

En este método, se utiliza el peróxido de hidrógeno como agente oxidante o decolorante para la lactosa, que presenta un color amarillento cristalino, así como para otras biomoléculas provenientes de la ultrafiltración y algunas sales disueltas.

El peróxido de hidrógeno, al hidrolizarse, actúa como un ácido débil con un valor de pK = 11,64 y se ioniza en la siguiente reacción:

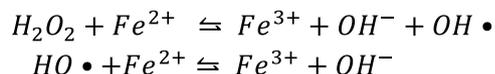


De tal forma que, en medios básicos el peróxido de hidrógeno produce el ion hidroperóxido, que se representa en la siguiente reacción:

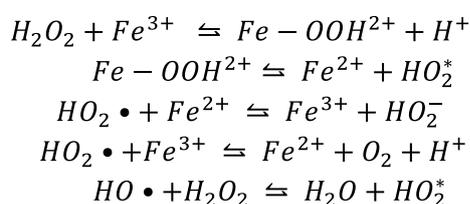


El ion hidropéroxido actúa como el agente oxidante de las moléculas, dado su alto potencial estándar de redox.

Cuando se añade peróxido de hidrógeno a un medio ácido junto con una sal ferrosa, se generan radicales hidroxilo mediante una reacción conocida como proceso Fenton. Este método comprende las siguientes reacciones:



A pH menor a 3, la reacción es autocatalítica, debido a que el hierro (III) descompone al peróxido de hidrógeno en oxígeno y agua a través de un mecanismo en cadena [16].



Como se observa, el proceso puede comenzar la reacción con el Fe (III), sin embargo, es muy lenta y forma el radical perhidroxilo $HO_2 \cdot$ el cual es mucho menos reactivo que el $\cdot OH$. A pH > 5, se genera precipitación del Fe^{3+} [13].

METODOLOGÍA

Muestreo del efluente

La extracción del efluente se realizó mediante «muestreo puntual», obteniendo muestras individuales (M1, M2, M3) en días distintos, sin mezclarlas entre sí. Este efluente, denominado permeado, proviene del flujo de salida del equipo de ultrafiltración de la leche. Las muestras fueron transportadas a las instalaciones de Tecsup en un cooler a 4 °C y luego conservadas en un frigorífico a la misma temperatura. Es importante destacar que las muestras se recolectaron en distintos meses.

Procedimiento de la caracterización de la muestra

A. Descripción de la muestra: La muestra presenta un color amarillento verdoso claro, con una leve viscosidad y un olor característico.

B. Determinación del pH: La medición del pH se realizó con un potenciómetro, mostrando valores entre 5,5 y 6,0 en cada muestreo del efluente.

C. Temperatura: La temperatura del efluente es crucial, ya que, si aumenta, puede provocar la cristalización de la alfa-lactosa, dificultando la oxidación homogénea y el contacto eficaz entre la lactosa y el oxidante.

D. Determinación de sólidos totales y sólidos suspendidos: El procedimiento se detalla en los diagramas de flujo de las figuras 2 y 3:

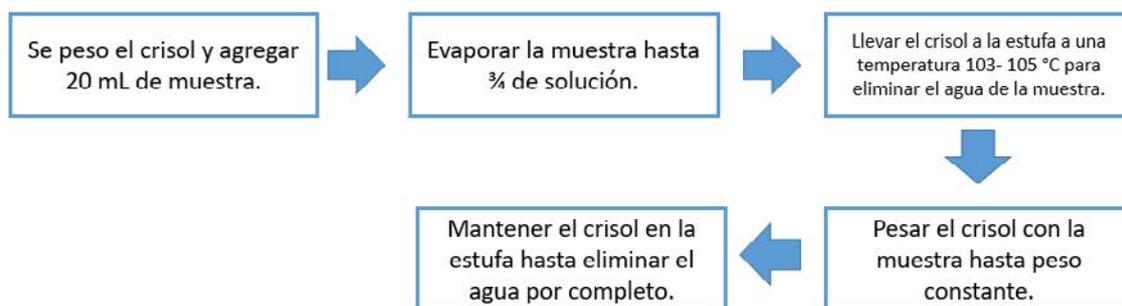


Figura 2. Pasos en la determinación de sólidos totales (ST)

Fuente: Elaboración propia.

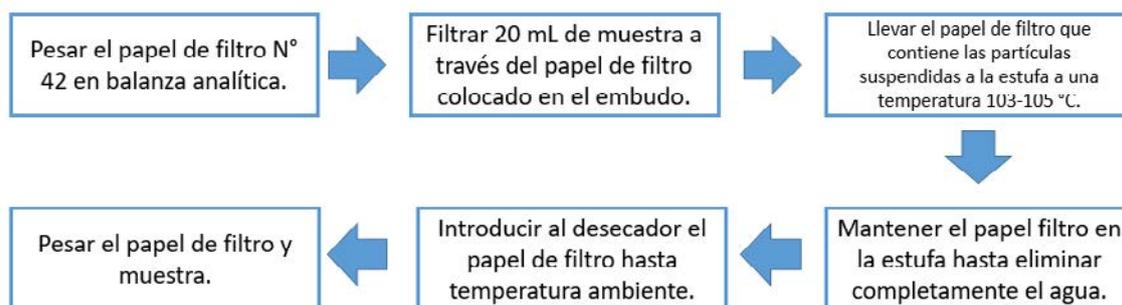


Figura 3. Pasos en la determinación de sólidos suspendidos totales (SST)

Fuente: Elaboración propia.

E. Conductividad: La conductividad del efluente varía entre 10 y 15 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo que sugiere que podría ser tratado fácilmente mediante un tratamiento biológico, ya que su baja conductividad indica una menor presencia de sales. Como se mencionó anteriormente, en el proceso de ultrafiltración de la leche, se separan la lactosa junto con el agua y algunas sales (como calcio y otros iones).

F. Determinación de la DQO: La demanda química de oxígeno (DQO) se mide como el oxígeno necesario para degradar la materia orgánica biodegradable y no biodegradable, utilizando dicromato de potasio como oxidante en un medio ácido. La metodología empleada para este parámetro es el método de reflujo cerrado o colorimétrico, utilizando viales de DQO con rangos de 200 mg/L a 15 000 mg/L.

Tabla 2
Detalles de medida del método colorimétrico para la realización de medida de DQO

Rango de medida de DQO (mg/L)	Volumen de muestra (mL)	Lectura de colorímetro multiplicada por
20-1500	2	1 (Lectura directa)
200-15 000	0,2	10

Fuente: [9].

En las mediciones de la DQO de la muestra estuvo en el rango de 19 000 mg/L a 23 000 mg/L.

G. Determinación de DBO por el método piezoeléctrico:

El método empleado para medir la DBO fue mediante un equipo respirométrico, que determina el resultado a partir de la variación de presión por el consumo de oxígeno. El procedimiento es el siguiente: primero, se diluye la muestra en una proporción adecuada, siempre que esté dentro del rango de determinación, según el criterio establecido:

con grageas de KOH, que absorben el CO_2 producido por las bacterias al degradar la materia orgánica, evitando interferencias en la medición de la variación de presión del oxígeno [9].

Finalmente, las botellas se colocan en el equipo respirométrico y los resultados se obtienen después de 5 días a una temperatura de 20 °C. Para obtener el valor final de la DBO, el resultado registrado a los 5 días se multiplica por el factor de dilución. La DBO de la muestra resultó entre 17 600 mg/L y 18 568 mg/L.

Tabla 3
Detalles de medida del método colorimétrico para la realización de medida de DBO

Rango de medida del DBO (mg/L)	V en botella (mL)
0-70	355
0-350	160
0-700	95

Fuente: [9].

Luego, se extrae la muestra diluida según el rango elegido previamente y se vierte en una botella ámbar, asegurándose de que los materiales estén secos y limpios. Se añade una pastilla magnética y un nutriente al frasco. La botella se cierra

Resultados de la caracterización del efluente

A partir de los resultados obtenidos, se calculó el promedio de varias muestras, como se muestra en la tabla 4. Se observa que la muestra presenta un alto valor de sólidos disueltos totales (SDT), principalmente debido a la presencia de lactosa disuelta y algunas sales (sodio y calcio). Al calcular el porcentaje de la relación DBO/DQO, se obtuvo un 88,22 %. Dado que el efluente tiene una DBO superior a 3000 mg/L, se considera no apto para un tratamiento biológico aeróbico.

Los métodos de oxidación avanzada aplicados a este efluente fueron el método Fenton y la ozonización, siendo el método Fenton el más eficiente debido a su alta capacidad de remoción en comparación con la ozonización.

Tabla 4
Caracterización del efluente promedio

Parámetro	Unidad	Resultados
pH	-----	5,40-6,00
DBO	mg/L	17 600
DQO	mg/L	19 950
SST	mg/L	2,62
SDT	mg/L	205,50
ST	mg/L	208,12
Conductividad específica	$\mu\text{S}/\text{cm}$	10,37
ORP	mV	162,80
Turbiedad	NTU	16,23

Fuente: Elaboración propia.

Diagrama de tratamiento de Fenton convencional

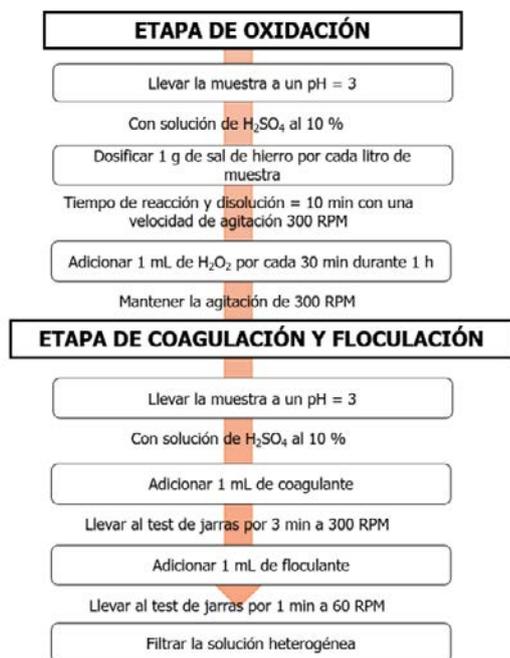


Diagrama de tratamiento por ozonización



Figura 4. Diagramas de los métodos de tratamiento aplicados

Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

A continuación, se muestra los resultados obtenidos en las tablas 5 y 6:

Tabla 5
Condiciones de oxidación y coagulación variando el pH de oxidación y floculación

Prueba 1 (Variación de pH de oxidación)			
Condiciones de oxidación	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
pH inicial	5,6	5,6	5,6
pH de trabajo	3	5	8
Temperatura (°C)	25	25	25
Volumen de muestra (mL)	1000	1000	1000
Condiciones de coagulación y floculación			
pH de trabajo	2,5	4,12	7,2
r. p. m. de coagulación	300	300	300
r. p m. de floculación	60	60	60
Tiempo de coagulación (min)	3	3	3
Tiempo de floculación (min)	1	1	1
Acerca de los reactivos utilizados			
HCl (mL) 20 %	22	3	42
NaOH (mL)	-	-	-
FeSO ₄ (s)	2,00	2,00	2,00
H ₂ O ₂ (mL) 50 % c/30min	1	1	1
Tiempo de adición de H ₂ O ₂ (h)	1	1	1
Reactivos de coagulación y floculación			
PAC (mL) al 16 %	2	2	2
Magnafloc al 0,1 %	0,5	0,5	0,5
Turbiedad final (NTU)	10,25	15,35	18,45

Tabla 6
Comparación de resultados de los diferentes pH de coagulación manteniendo constante el pH = 3 de oxidación

Prueba 2 (Variación de pH de coagulación-floculación)			
Condiciones de oxidación	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
pH inicial	5,6	5,6	5,6
pH de trabajo	3	3	3
Temperatura (°C)	25	25	25
Volumen de muestra (mL)	500	500	500
Condiciones de coagulación y floculación			
pH de trabajo	3	5	8
r. p. m. de coagulación	300	300	300
r. p. m. de floculación	60	60	60
Tiempo de coagulación (min)	3	3	3
Tiempo de floculación (min)	1	1	1
Acerca de reactivos utilizados			
HCl (mL) 20 %	14	22	17
NaOH (mL)	-	-	-
FeSO ₄ (g)	2,00	2,00	2,00
H ₂ O ₂ (mL) 50 % c/30 min	1	1	1
Tiempo de adición de H ₂ O ₂ (h)	1	1	1
Reactivos en etapa de coagulación y floculación			
NaOH (mL) 10 %	0	18	40
PAC (mL) 16 %	2	2	2
Magnafloc 0,1 %	0,5	0,5	0,5
Resultados			
Turbiedad (NTU) final	20,5	8,76	43,6

Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, las condiciones óptimas para la aplicación del método Fenton convencional, deducidas del análisis de la Tabla 5, indican que el valor de pH óptimo para la oxigenación es de 3, ya que a este pH se logra la menor turbidez final. Las pruebas posteriores se realizaron con este valor de pH. Además, se observó que, al duplicar la dosis de peróxido de hidrógeno, las condiciones variaron entre las pruebas, trabajándose inicialmente con 1000

mL de muestra de agua residual (tabla 5) y luego con 500 mL (tabla 6).

A continuación, en las tablas 7, 8 y 9, se presentan los resultados obtenidos en las pruebas para la remoción de materia orgánica (lactosa) mediante el método Fenton convencional.

Fenton convencional

Tabla 7
Determinación de DQO para diferente dosis de peróxido de hidrógeno, a pH = 3 de oxidación, con 60 min de reacción y 2000 mg/L FeSO₄

Variando la dosificación de peróxido de hidrógeno				
Volumen (mL)	0,5	1,0	2,0	3,0
Dosis(mg/L)	598	1 196	2 392	3 588
DQO (mg/L)	10 520	7 280	8 160	9 300
Turbiedad (NTU)	1,81	3,64	5,83	37,66
Remoción (%)	47	64	59	54

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8
Determinación de DQO para diferentes dosificaciones de sulfato ferroso, a pH = 3 de oxidación, con 60 min de reacción y 1 196 mg/L de peróxido de hidrógeno

Variando la dosificación de sulfato ferroso				
Masa (g)	0,4	0,7	1,0	1,3g
Dosis(ppm)	800	1 400	2 000	2 600
DQO (mg/L)	10 780	9 960	7 280	10 880
Turbiedad (NTU)	1,81	3,64	5,83	37,66
Remoción (%)	46	50	64	46

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9

Determinación de DQO para distintos tiempos de reacción, a pH = 3 de oxidación, con 1196 mg/L de peróxido de hidrógeno y 2 000 mg/L de sulfato de ferroso

Variando el tiempo de oxidación				
Tiempo (minutos)	20	30	40	50
DQO (mg/L)	11 840	7 280	10 840	11 600
Turbiedad (NTU)	14,25	3,64	42,7	22,33
Remoción (%)	41	64	46	42

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con las tablas 7, 8 y 9, se deduce que, para maximizar la remoción de DQO mediante el método Fenton convencional, se deben aplicar las siguientes condiciones: pH de 3, dosis de 1196 mg de peróxido de hidrógeno al 50 % por litro de agua residual, dosis de catalizador sulfato ferroso de 1 g/L y un tiempo de reacción en *batch* de 30 minutos en cada una de las dos etapas de reacción (2 reactores en serie). Con base en estos resultados, se recomienda optimizar las condiciones para

realizar pruebas en un sistema piloto que ajuste las condiciones experimentales.

Ozonización

En la tabla 10 y 11 se ordenan los resultados de las pruebas de ozonización, según lo siguiente:

Tabla 10

Determinación de DQO variando el pH, con 20 min de reacción y 2,5 g/L de ozono

Variando el pH de oxidación				
pH de ozonización	5	6	7	8
DQO(mg/L)	14 780	12 280	13 660	14 600
Turbiedad (NTU)	19,25	14,68	20,7	28,39
Remoción (%)	26	39	32	27

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11

Determinación de DQO para distintos tiempos de reacción, a pH = 6 y 2,5 g/L de ozono

Variando el tiempo de oxidación (min)				
Tiempo (min)	10	15	20	25
DQO (mg/L)	11 340	11 920	12 280	15 200
Turbiedad (NTU)	15,68	18,75	14,68	37,56
Remoción (%)	43	40	39	24

Fuente: Elaboración propia.

Según los resultados en las tablas 10 y 11, se concluye que, para maximizar la remoción de DQO mediante ozonización, se debe trabajar a un pH de 6 y con un tiempo de reacción en *batch* de 10 minutos. Con base en estos resultados, se recomienda optimizar estas condiciones para realizar pruebas en un sistema piloto que ajuste los parámetros experimentales. Asimismo, se observa que el método Fenton ofrece una mayor remoción de DQO y mejores valores de turbidez final, por lo que se recomendaría como el método más eficaz en este estudio.

de remoción no fue suficiente debido a la alta estabilidad del disacárido en dosis bajas y a la formación de productos intermedios solubles en dosis altas, lo que dificulta su remoción en los procesos posteriores de coagulación y floculación.

CONCLUSIONES

- Las pruebas realizadas con el método de oxidación avanzada Fenton mostraron una mayor remoción de DQO en comparación con la ozonización, alcanzando un máximo de 64 % y 39 %, respectivamente. Sin embargo, este nivel

- La optimización del método Fenton para el efluente lactosado se alcanzó mediante dos etapas con tiempos de retención *batch* de 30 minutos, utilizando una dosis de 1196 mg/L de H₂O₂, 2000 mg/L de FeSO₄ y pH 3 para la oxidación y la coagulación. Esta prueba logró reducir gran parte de la materia orgánica, alcanzando una DQO final de 7280 mg/L.
- Por lo tanto, el método Fenton puede ser utilizado como un pretratamiento para el efluente lactosado, permitiendo su dilución con otros flujos para ingresar al biorreactor y facilitar su remoción.

- Queda pendiente el estudio de los caudales adicionales necesarios para mezclar con el efluente en cuestión y hacerlo apto para el biorreactor. El caudal final para ingresar al biorreactor deberá definirse en este balance pendiente.

REFERENCIAS

- [1] Adroezzi, R., Caprio V., Insola A., & Marotta R. (1999). Advanced oxidation processes (AOP) for water purification and recovery. *Revista Elsevier*, 51-55.
- [2] Alais, C. (2003). *Ciencia de la leche: Principios de técnica lechera* (4.ª ed.). Editorial Reverté.
- [3] APHA, AWWA & WPCF. (2005). *Métodos normalizados para análisis de aguas potables y residuales* (17.ª ed.). Díaz de Santos.
- [4] Beltrán, F. (2003). *Ozone reaction kinetics for water and wastewater systems*. Lewis Publishers.
- [5] Dirección General de Salud Ambiental (Digesa). *Gesta agua, grupo de estudio técnico ambiental: Propiedades organolépticas*. Digesa.
- [6] Enrique, J. (1998). *Análisis de aguas y desagües* (2.ª ed.). Banco de Libros, Dirección de Bienestar Universitario.
- [7] Tecsup. (2019). *Guía de laboratorio ambiental: Procedimiento para la determinación de la demanda química de oxígeno*. Tecsup.
- [8] Ikehata, K. & Li, Y. (2005). Ozone-based processes. *Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment*, 5, 116-118.
- [9] Kemer, F. & McCallion, J. (1998). *Manual del agua: Su naturaleza, tratamiento y aplicaciones*. Editorial McGraw-Hill Interamericana.
- [10] Litter, M. (2003). Tecnologías avanzadas de oxidación: Tecnologías solares. *Solar Safe Water*, 5, 83-85.
- [11] Loeb, B. *et al.* (2012). Worldwide ozone capacity for treatment of drinking water and wastewater: A review. *Ozone: Science & Engineering*, 34, 64-77.
- [12] Ministerio del Ambiente. (25 de marzo de 2010). *Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM: Aprueban los límites máximos permisibles para los efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales*. Diario Oficial *El Peruano*, 25 de marzo de 2010.
- [13] National Small Flows Clearinghouse (NSFC). (1997). *Pipeline: Small community wastewater issues explained to the public*, 8(4).

[14] Passoti, L. *et al.* (2017). La fermentación de la lactosa a etanol en suero de queso, permeado y concentrado por *Escherichia coli*. *Worldwidescience*, 1, 1-5.

[15] Renner, E. & Abd-El-Salam, M. H. (1991). Application of ultrafiltration in the dairy industry. *Dairy Science Section, Justus Liebig University, Giessen Germany*.

[16] Yatagai, T., Ohkawa, Y., Kubo, D. & Kawase, Y. (2017). Hydroxyl radical generation in electro-Fenton process with a gas-diffusion electrode: Linkages with electrochemical generation of hydrogen peroxide and iron redox cycle. *National Library of Medicine*, 52(1), 74-83.

ACERCA DE LOS AUTORES

Huguez Ames Ramírez

Ingeniero químico de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, magister en Educación por la Universidad de Piura y especializado en Tratamiento de Aguas Residuales. Actualmente cursa un doctorado en Ingeniería y Ciencias Ambientales en la Universidad Agraria La Molina. Tiene experiencia en la industria química, metalúrgica y en el tratamiento de aguas residuales e industriales, trabajando en plantas de tratamiento de agua y relaves mineros. Ha sido docente en la Universidad Agraria La Molina, Universidad Privada del Norte, Universidad Continental, Universidad María Auxiliadora y Tecsup. Actualmente es ingeniero jefe de procesos en la PTAR Pachacútec de ACCIONA, destacada por su calidad de agua. Además, ha sido conferencista en eventos como Perumin y tiene publicaciones en revistas especializadas.

@ hames@tecsup.edu.pe

Yorsel Mayhua Soto

Ingeniera industrial egresada de la UPC, licenciada en Educación por la Universidad Enrique Guzmán y Valle la Cantuta, y magister en Gestión Ambiental para el Desarrollo Sostenible por la Universidad Nacional del Callao. Además, ha realizado diplomados en Derecho Ambiental y Fiscalización Ambiental en la Universidad Continental. Cuenta con experiencia en control de calidad en empresas como Kimberly Clark y Laboratorios SMASAC. Desde 2013, se desempeña como docente en el área de Minería y Procesos Químico-Metalúrgicos en Tecsup N° 1 Lima, donde trabaja en investigaciones y proyectos relacionados con el tratamiento de aguas y efluentes industriales, colaborando estrechamente con otros docentes en el desarrollo de soluciones ambientales.

@ ymayhua@tecsup.edu.pe

Ulises Quiroz Aguinaga

Profesor de la Universidad Nacional de Ingeniería UNI y miembro fundador de la Sociedad Peruana de Electroquímica. Las investigaciones que realiza se centran en la síntesis de nanomateriales y el desarrollo de materiales carbonosos para su uso en sensores electroquímicos. Adicionalmente, las investigaciones buscan la remoción de contaminantes del agua como colorantes, medicamentos y pesticidas mediante procesos de oxidación avanzada.

 uquiroz@tecsup.edu.pe

Recibido: 27-05-24
Revisado: 17-09-24
Aceptado: 21-10-24



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons AtribuciónNoComercial 4.0 Internacional.