

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA FOTO-FENTON APLICADO AL RIO ROCHA

WASTEWATER TREATMENT WITH ADVANCED OXIDATION PROCESSES PHOTO-FENTON APPLIED TO ROCHA RIVER

MSc. Carlos Marcelo Camacho Caero ^{1 * S}
<https://orcid.org/0000-0002-5083-2572>

Recibido: Marzo 10, 2024; Aceptado: Mayo 02, 2024

RESUMEN

El reúso de aguas residuales para producción de cultivos es una práctica muy común en Bolivia, pero en muchas ocasiones estas no cuentan con la calidad fisicoquímica necesaria para garantizar que los productos agrícolas no se dañen, adquieran patógenos o compuestos altamente contaminantes. En Cochabamba Bolivia el Rio Rocha tiene un alto grado de contaminación no solo doméstica sino industrial, para luego ser utilizado para riego. Además, su relación $DBO_5/DQO > 0.6$ (agua no biodegradable), no es posible aplicar tratamientos convencionales, por este motivo, se deben presentar otro tipo de propuestas de tratamiento más adecuadas, una alternativa es proponer una planta de tratamiento con procesos de oxidación avanzada foto-Fenton (POA foto-Fenton) como principal etapa de depuración. Esta planta contempla una rejilla (con capacidad de eliminar sólidos de hasta 2 mm), centrífuga de sólidos, POA foto-Fenton (con relación molar de $[H_2O_2]/DQO$ entre 2 a 2.5 y $[H_2O_2]/[Fe^{+2}] = 100$ y un tiempo de residencia en el reactor tubular de aproximadamente 30 min más lo calculado teóricamente con la constante cinética) y membranas de ultrafiltración como etapa final todos para un caudal de 50 m³/h. Finalmente, la investigación reveló que es necesario considerar algunas ecuaciones de variación para los cambios de temperatura, cinética y diseño del reactor, degradación de contaminantes, procedimientos experimentales de análisis fisicoquímico que contemplen al radical hidróxido que se está generando, intensidad de luz UV y las partículas suspendidas ya que todas estas perjudican al tratamiento.

Palabras claves: Foto-Fenton, aguas residuales, cultivo, diseño de PTAR.

ABSTRACT

The reuse of wastewater for farming production is a very common practice in Bolivia, but in many cases, it does not have the necessary physicochemical quality to ensure that agricultural products are not damaged, acquire pathogens or highly contaminating compounds. In Cochabamba Bolivia, the Rocha River has a high degree of pollution, domestic and industrial, and is then used for irrigation. Besides, the BOD_5/COD ratio > 0.6 (non-biodegradable water), it is not possible to apply conventional treatments. The treatment alternative is a treatment plant with advanced oxidation processes photofenton (AOP photofenton) as the main purification stage. This plant includes a grate (with the capacity to remove solids up to 2 mm), a solids centrifuge, AOP photofenton (with a molar ratio of $[H_2O_2]/COD$ between 2 to 2.5 and $[H_2O_2]/[Fe^{+2}] = 100$ and a residence time in the tubular reactor of approximately 30 min plus what was theoretically calculated with the kinetic constant and ultrafiltration

membranes as the final stage, all for a flow rate of 50 m³/h. Finally, the investigation revealed its necessary to consider some variation equations for temperature changes, reactor kinetics and design, contaminant degradation, experimental physicochemical analysis procedures that consider the hydroxide radical that is being generated, UV light intensity and the suspended particles since all of these affect the treatment.

Keywords: photofenton, wastewater, cultivation, WWTP design.

Citación: Camacho Caero Carlos M., **TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA FOTO-FENTON APLICADO AL RIO ROCHA**. Revista Científica EMINENTE 2024, 8-1: 23-35.

¹ Ingeniero Químico –Investigador de Unidad de Investigación Ciencia y Tecnología - Unidad Académica Cochabamba - Escuela Militar de Ingeniería

* Corresponde al Autor (correo electrónico: carlosmarcelocamacho@hotmail.com).

⁵ Dirección de contacto Investigador: Telf.: (+591) 70369148 Cochabamba – Bolivia.

INTRODUCCIÓN

En Latinoamérica tiene un capital de agua per cápita promedio de 22.929 m³/hab/año, a pesar de que se cuenta con recursos hídricos, la escasez de este recurso está en crecimiento [1]. Bolivia, pertenece a esta zona geográfica, donde el aumento constante de evaporación de cuencas y la subida de temperatura media de las mismas, presentan escenarios perjudiciales para los habitantes en años futuros [2].

El presente trabajo de investigación está situado en inmediaciones del Rio Rocha cerca de la Escuela Militar de Ingeniería U.A. Cochabamba Zona Muyurina. La contaminación presente en el rio es alta y no presenta biodegradabilidad ($DBO_5/DQO < 0.6$), por lo que tratamientos biológicos u oxidativos con oxígeno están descartados [3]. La contaminación de esta cuenca llega desde los municipios de Sacaba y Parotani (dónde después sufren dilución), pero aun así la concentración de contaminantes sigue en aumento [4].

A pesar de los esfuerzos para la mitigación de compuestos dañinos con el medio ambiente en los municipios de Sacaba y Cochabamba, no se logra controlar, esto debido a una falta de mantenimiento de los procesos de tratamiento por falta de presupuesto [5]. En adición, no existe ningún tipo de proceso que elimine los compuestos contaminantes en diferentes regiones del área metropolitana de Cochabamba, que está provocando un aumento en coliformes totales, la conductividad (presencia de iones) y los sólidos suspendidos (material orgánico e inorgánico particulado) [6].

Una alternativa para la degradación rápida de compuestos es el proceso de oxidación avanzada foto-Fenton, que consiste principalmente en la generación del radical hidroxilo, quien realiza el tratamiento, por medio de una oxidación del hierro ferroso (Fe^{2+}) y Peróxido de Hidrogeno para después regenerar el Fe^{2+} por acción de luz (artificial o natural) [7] y así hasta agotar los reactivos o el contaminante. Un parámetro decisivo para el tratamiento es las relaciones molares que tienen los reactivos, diversos estudios señalan que se debe tomar en cuenta: $[Fe^{2+}]/[H_2O_2]$, $[H_2O_2]/[DQO]$, $COD/H_2O_2/Fe^{2+}$, $UV/[H_2O_2]$ y $UV/[H_2O_2]/[Fe^{2+}]$ para que la degradación de los contaminantes

se lleve con normalidad [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16]

La finalidad de esta investigación es encontrar los parámetros de control necesarios para que el proceso de oxidación avanzada (POA's) foto-Fenton pueda reducir la contaminación del Rio Rocha desde la zona de la Muyurina del municipio de Cochabamba – Bolivia, basándose en modelos cinéticos de tratamiento y así proponer un tren de tratamientos, considerando como principal tratamiento un reactor que aplique los POA's foto-Fenton, para reutilizar el agua en cultivos de lolium que requieren un caudal de agua de 50 m³/h aproximadamente para una superficie de 70 hectáreas.

OBJETIVO GENERAL

Diseñar un sistema de tratamiento de aguas basado en procesos de oxidación avanzada, considerando normativas bolivianas a nivel de agua para riego.

METODOLOGÍA

Para llevar a cabo el proceso de tratamiento se presentaron una serie de propuestas, que fueron evaluadas para mitigar la contaminación.

Método de muestreo

Las técnicas de muestreo fueron desarrolladas con base en [17], donde se especifica como identificar el:

- Lugar de muestreo: sitio físico donde se tomará la muestra, no debe tener focos de contaminación, fácil acceso, representativo, fijo.
- Punto de muestreo: punto físico de donde se tomará la muestra, debe ser un punto accesible y que dé cabida a diferentes técnicas de muestreo.

Procedimiento de toma de muestra: el recipiente muestreador debe estar limpio, seco y asegurado, enjuagar con la muestra el frasco, tratar de tomar todas las muestras en el menor tiempo posible para evitar fluctuaciones, tomar la muestra en contra corriente, debe sumergirse el frasco de muestreo (considerar si tienen preservante o no), llevar la hoja de documentación. En la Tabla 1 se puede observar la cantidad de frascos, preservante, volumen aproximado y que análisis se pueden hacer.

Tabla 1. Frascos y parámetros para muestreo, con el volumen aproximado y el preservante respectivo

Parámetros	Volumen aprox. [mL]	Preservante
pH, conductividad, cloruros, DBO ₅ , sulfatos	1000	Ninguno
Oxígeno disuelto	200	Ninguno
DQO, N-NH ₄ , N org, Fósforo total	1000	1:1 H ₂ SO ₄
Hierro total	300	1:1 HNO ₃

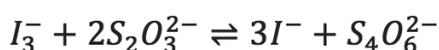
Fuente: Elaboración propia

Determinación de Peróxido de Hidrógeno

El procedimiento de determinación de Peróxido de Hidrógeno se realizó según los métodos de Cáceres, (2003) y Solvay, (2000).

El principio del método es que el ion yoduro que está en exceso y se genera ion triyoduro el cual luego es titulado con una solución estandarizada de Tiosulfato de Sodio.

Para lograr la determinación se debe tomar entre 5 a 20 mL de muestra, adicionar 25 mL de Agua destilada, 20 mL de solución de H₂SO₄ 2N y 25 mL de KI 0.2N. Esperar unos minutos a que se forme el color y titular con una solución estandarizada de Tiosulfato de Sodio 0.1 N hasta un amarillo pálido, añadir 1 mL de indicador de Almidón y titular hasta que sea transparente.



$$C_{H_2O_2} \left[\frac{mg}{L} \right] = \frac{N_{S_2O_3^{2-}}}{2} * \frac{V_{S_2O_3^{2-}}(mL) \cdot 34000}{V_M(mL)}$$

Dónde:

$N_{S_2O_3^{2-}}$ = Normalidad del tiosulfato de sodio

$V_{S_2O_3^{2-}}(mL)$ = Volumen del titulante de tiosulfato de sodio [mL]

$V_M(mL)$ = Volumen de muestra [mL]

Determinación de demanda química de oxígeno

Se aplicó el procedimiento basado en la EPA Método 410.4, se utilizó un espectrofotómetro de la marca SELECTA con cubetas de vidrio.

La muestra se homogenizó y se tomó 2 mL, se transvasó al vial que contenía el reactivo de Hanna Instruments HI93754B-25 (rango medio), se llevó por 2 h de digestión a 150°C, se enfrió protegiendo de la luz y luego se midió la absorbancia (abs) a 610 nm.

Determinación de la dosis óptima de coagulante

Se preparó tres soluciones a 20000 ppm de Sulfato Ferroso FeSO₄·7H₂O, Sulfato Férrico Fe₂(SO₄)₃·xH₂O y Sulfato de Aluminio Al₂(SO₄)₃·18H₂O, asumiendo el mejor midiendo la cantidad de coagulante utilizado y la remoción de la turbidez. Según el equipo de prueba de jarras Lovibond se tomó 600 mL de muestra a 120 rpm (coagulación) por 2 minutos, 30 rpm (floculación) por 25 min, y sedimentación por 20 min [18], [19].

Determinación de los gradientes de velocidad

Tabla 2. Toma de muestra de experimento de gradientes de velocidad

Tiempo min	Acción por Efectuar
0	Comienza la floculación al gradiente seleccionado
7	Se levanta el agitador de la celda N° 1
14	Se levanta el agitador de la celda N° 2
17	Se toma la 1° muestra de la celda N° 1
21	Se levanta el agitador de la celda N° 3
24	Se toma la 1° muestra de la celda N° 2
27	Se toma la muestra de la central N° 1
28	Se levanta el agitador de la celda N° 4
31	Se toma la 1° muestra de la celda N° 3
34	Se toma la muestra de la central N° 2
35	Se levanta el agitador de la celda N° 5
38	Se toma la 1° muestra de la celda N° 4
41	Se toma la muestra de la central N° 3
42	Se levanta el agitador de la celda N° 6
45	Se toma la 1° muestra de la celda N° 5
48	Se toma la muestra de la central N° 4
52	Se toma la 1° muestra de la celda N° 6
55	Se toma la muestra de la central N° 5
62	Se toma la muestra de la central N° 6

Fuente: Elaboración propia

Utilizando el mejor coagulante y dosis, se determinó los gradientes de velocidad para 30, 50 y 70 rpm (floculación) a gradientes de 9.6; 22.3 y 36.8 s⁻¹ respectivamente, con tiempo de sedimentación de 10 y 20 min, en la tabla 2 se muestra los puntos de toma de muestra [20].

Una vez tomada la muestra en los tiempos que describe la tabla 1, se determinó la turbidez.

Determinación de parámetros fisicoquímicos de agua

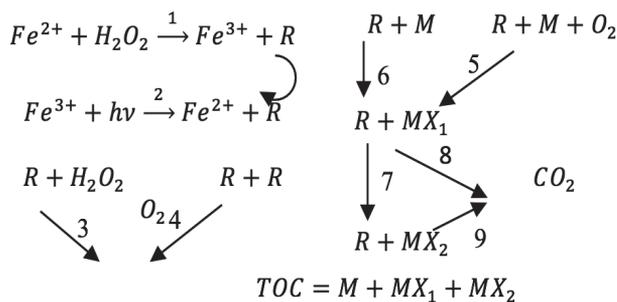
Se utilizó Métodos estándar para el examen de agua y aguas residuales, en la tabla 3 se presentan con sus respectivos códigos.

Tabla 3. Métodos de ensayo fisicoquímico

PARÁMETROS	EMI U.A. Cochabamba
pH	SM-4500-H ⁺ B
Conductividad	SM-2510 B
DQO	SM-DQO-D colorimétrico*
Turbidez	SM-2130-B nefelométrico

Fuente: SM: STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER, 24TH ED

Determinación de la cinética de trabajo



La toma de datos fue llevada en reactores de 370 mL, tomando muestras cada 10 minutos, 1 a 2 mL de muestra para determinación de DQO y 5 mL para determinar los peróxidos de hidrógeno. Los datos se contrastaron Cabrera Reina et al., (2012) & Nasr Esfahani et al., (2022), en la Fig. 1 se ilustra las reacciones supuestas que están sucediendo en el reactor.

Figura 1. Reacciones químicas de Procesos de oxidación avanzada foto-Fenton supuestas. R: radical hidroxilo, TOC: DQO, hv: energía a longitud de onda 254 nm, M, MX₁ y MX₂ sustancias orgánicas desde la primaria a las descompuestas

Velocidades de reacción

$$\begin{aligned}
 r_1 &= k_1 \cdot [Fe^{+2}] \cdot [H_2O_2] \\
 r_2 &= k_2 \cdot [Fe^{+2}] \cdot [I] \\
 r_3 &= k_3 \cdot [R] \cdot [H_2O_2] \\
 r_4 &= k_4 \cdot [R] \cdot [R] \\
 r_5 &= k_5 \cdot [M] \cdot [R] \cdot [O_2] \\
 r_6 &= k_6 \cdot [M] \cdot [R] \\
 r_7 &= k_7 \cdot [MX_1] \cdot [R] \\
 r_8 &= k_8 \cdot [MX_1] \cdot [R] \\
 r_9 &= k_9 \cdot [MX_2] \cdot [R]
 \end{aligned}$$

Balance de masa

$$\frac{d[TOC]}{dt} = \frac{d[M]}{dt} + \frac{d[MX_1]}{dt} + \frac{d[MX_2]}{dt}$$

$$\frac{d[O_2]}{dt} = \frac{F}{V} * ([O_2]_o - [O_2]) + g_1 r_3 + g_2 r_4 + c_1 r_5 + (K_{La}([O_2]^* - [O_2]))$$

$$\frac{d[Fe^{+2}]}{dt} = \frac{F}{V} * ([Fe^{+2}]_o - [Fe^{+2}]) - r_1 + r_2$$

$$\frac{d[Fe^{+3}]}{dt} = \frac{F}{V} * ([Fe^{+3}]_o - [Fe^{+3}]) + r_1 - r_2$$

$$\frac{d[R]}{dt} = \frac{F}{V} * ([R]_o - [R]) + r_1 + r_2 - r_3 - 2r_4 - r_5 - r_6 - r_7 - r_8 - r_9$$

$$\frac{d[H_2O_2]}{dt} = \frac{F}{V} * ([H_2O_2]_o - [H_2O_2]) - r_1 - r_3$$

$$\frac{d[M]}{dt} = \frac{F}{V} * ([M]_o - [M]) - r_5 - r_6$$

$$\frac{d[MX_1]}{dt} = \frac{F}{V} * ([MX_1]_o - [MX_1]) + r_5 + r_6 - r_7 - r_8$$

$$\frac{d[MX_2]}{dt} = \frac{F}{V} * ([MX_2]_o - [MX_2]) + r_7 - r_9$$

Las constantes se utilizaron de los estudios mencionados anteriormente (k_1 , k_2 , k_3 , k_4 , k_5 , k_6 , k_7 , k_8 y k_9), K_{La} constante de transferencia de masa del oxígeno, $[O_2]^*$ concentración de saturación del oxígeno en agua, $[I]$ es la intensidad de la radiación UV, F el flujo de entrada y salida al reactor y V volumen de reactor (todo en sistema internacional). La lámpara UV es de la marca OSRAM de 1.7 w UV-C 254 nm

16x212mm. forrado con papel aluminio, la lámpara en un tubo de vidrio y se aplicó el balance de masa para un reactor batch.

Dimensionamiento de planta de tratamiento

En la tabla 4 se muestran los tratamientos considerados para este tipo de agua residual y para el fin de llegar a agua de riego.

Tabla 4. Dimensionamientos de procesos de tratamiento

Tratamiento	Autor
Rejilla	[23]
Centrifugación	[24], [25]
Procesos de oxidación avanzada foto-Fenton	[26]
Membrana de ultrafiltración	[27]

Fuente: Elaboración propia

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Lugar de muestreo

El lugar de muestreo está cercano a la EMI para minimizar costos de traslado: Las coordenadas de ubicación son (-17.378371, -66.147805) quedando el punto a unos 80 metros de la entrega a la Escuela Militar de Ingeniería.

Coagulación y floculación

En la tabla 5 se observa los datos del proceso de coagulación y floculación con las condiciones dadas.

Tabla 5. Resultados de la prueba de coagulantes

$Al_2(SO_4)_3$ [ppm]	NTU	pH	Cond [$\mu S/cm$]
100	20,8	7,73	1148
200	7,87	7,48	1229
300	4,85	7,21	1316
400	2,72	6,81	1405
500	2,35	6,82	1468
$FeSO_4$ [ppm]	NTU	pH	Cond [$\mu S/cm$]
100	81,8	7,56	1090
200	46,9	7,38	1128
300	85.0	7,37	1179

400	42,8	7,30	1247
500	44.0	7,40	1302
$Fe_2(SO_4)_3$ [ppm]	NTU	pH	Cond [$\mu S/cm$]
100	18.00	7,43	1083
200	8,53	7,09	1104
300	3,92	6,73	1138
400	1,06	6,35	1143
500	2,53	6,43	1167

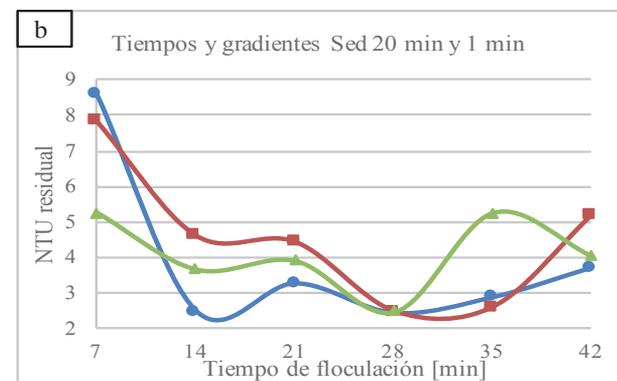
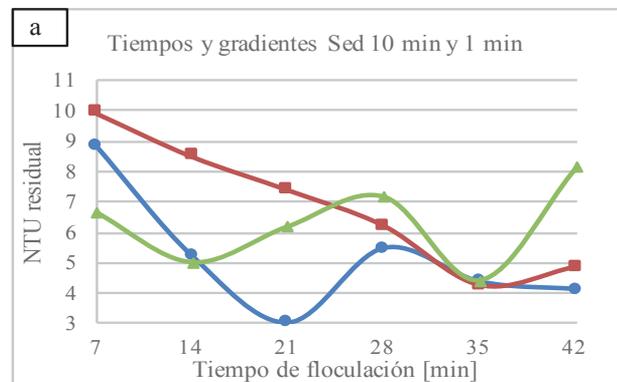
Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que el mejor coagulante es el sulfato férrico llegando a tener mayor remoción de turbidez con una concentración similar de coagulante.

Gradientes de velocidad

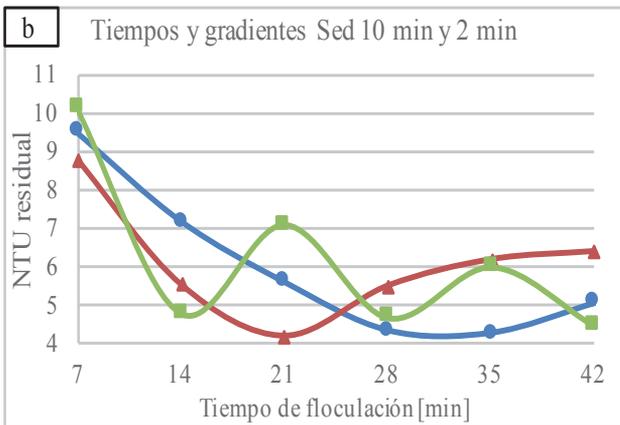
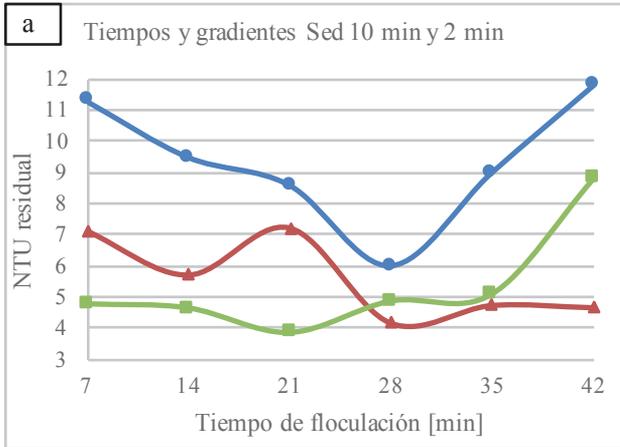
En las gráficas 1 y 2, se ilustran los resultados de los gradientes con agitación rápida por 1 y 2 min y 10 y 20 min de sedimentación respectivamente.

Gráfica 1. Resultados de gradientes a 150 rpm (agitación rápida) por 1 minuto: a) con 10 min de sedimentación y b) con 20 min de sedimentación
 (●G=9.6 s⁻¹, ■ G=22.3 s⁻¹, ▲ G=36.8 s⁻¹)



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 2. Resultados de gradientes a 150 rpm (agitación rápida) por 2 minutos: a) con 10 min de sedimentación y b) con 20 min de sedimentación
 (●G=9.6 s⁻¹, ■ G=22.3 s⁻¹, ▲ G=36.8 s⁻¹)



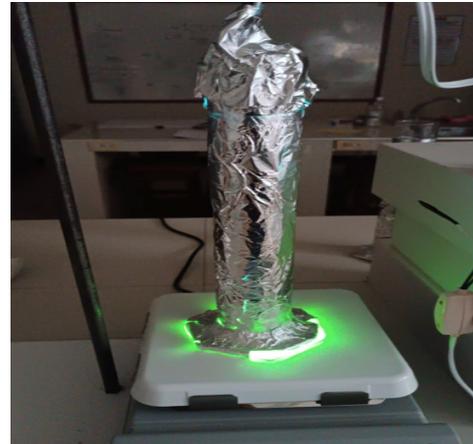
Fuente: Elaboración propia

Los resultados con un tiempo de agitación rápida de 2 minutos exceden los niveles de turbidez para lo cual se considera un buen tratamiento en las siguientes condiciones: agitación rápida 150 rpm por 1 min, agitación lenta 30 rpm por 14 min y con 20 minutos de sedimentación.

Posteriormente para corroborar los datos en el periodo 2/2022, se volvieron a realizar todos estos procedimientos hallando una cantidad de coagulante superior a la que se necesita anteriormente, aproximadamente 700 ppm, siendo un gasto económico muy grande, ya que el caudal de río Rocha puede variar entre 0.03 a más de 9 m³/s [6], por lo que es necesario considerar otro proceso que pueda llegar al mismo rendimiento.

Proceso de oxidación avanzada foto-fenton

Figura 1. Reactor para procesos de oxidación avanzada foto-Fenton

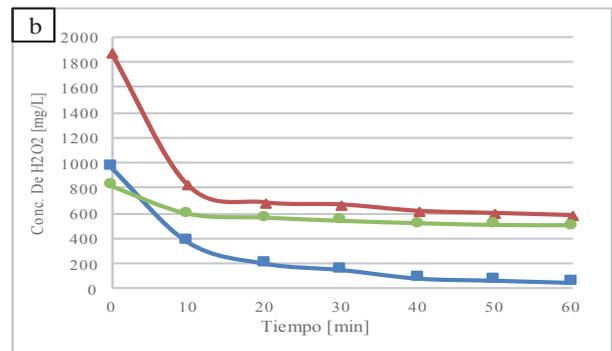
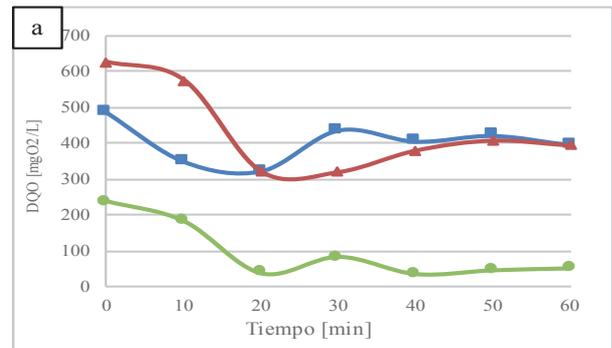


Fuente: Elaboración propia

El reactor fue una probeta de 500 mL montado como se ilustra en la Fig. 1.

Se probaron relaciones molares de [DQO]/[H₂O₂] de 1/2, 1/3, 1/5, mostradas en la gráfica 3.

Gráfica 3. Variación de a) DQO y b) peróxido de hidrógeno en el tiempo con diferentes relaciones molares de [DQO]/[H₂O₂] (■1/2, ▲1/3, ●1/5)

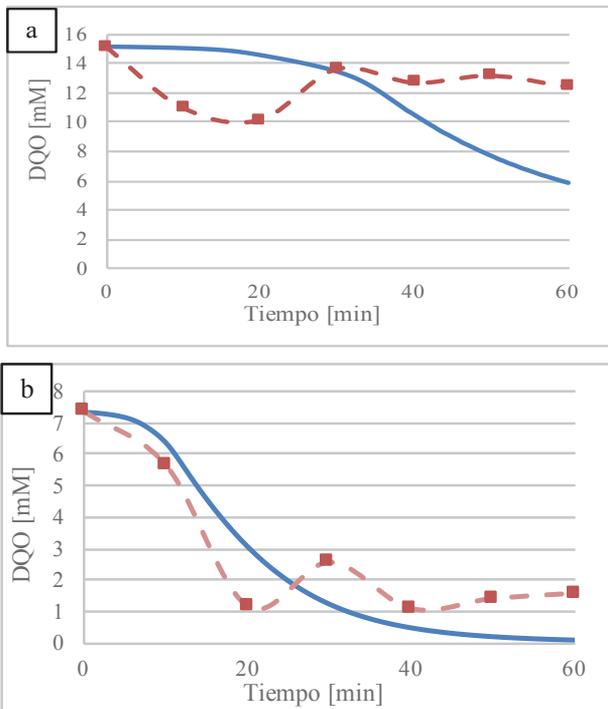


Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que los para valores de relación molar cercanos a $[DQO]/[H_2O_2]=1/2$, el consumo de Peróxido de Hidrógeno va disminuyendo progresivamente y a diferencia de los demás, lo que permite inferir que puede que existan compuestos que inhiban al catalizador del hierro, efecto del pH de trabajo, puede que la intensidad de la luz no es la suficiente para que se lleve a cabo alguna reacción o el consumo de peróxido hace que no se genere el radical hidroxilo.

Por otro lado, el proceso es no isotérmico elevándose la temperatura de ambiente a $40^\circ C$, lo que hace necesaria una chaqueta para el intercambio de calor. Finalmente, para el diseño de un reactor de este tipo es necesario considerar la chaqueta, aumentar la intensidad de las lámparas y el volumen del reactor. Para el proceso de eliminación de sólidos se utilizó papel filtro para conocer si existe diferencia entre uno que no sea filtrado. En la gráfica 4 se puede observar la comparación entre la simulación del proceso y los datos reales sin filtración y $[DQO]/[H_2O_2] = 1/2$ y con filtración y $[DQO]/[H_2O_2]=1/5$ respectivamente.

Gráfica 4. Comparación de los datos reales (---) con los simulados (línea sólida) a) Sin filtrar y 1/2 de relación molar $[DQO]/[H_2O_2]$, b) filtrado y 1/5 de relación molar $[DQO]/[H_2O_2]$



Fuente: Elaboración propia

Se observa en la gráfica 4b que no existe mucha discrepancia entre los datos reales y los simulados lo que implica que el modelo puede ser utilizado para el diseño de la propuesta de tratamiento.

Propuesta de diseño final

Para la rejilla

$$A = Wh$$

$$V = \frac{Q}{A}$$

$$L = \frac{h + hb}{\text{sen } \theta}$$

$$C = (W - nd_b)/(n + 1) \text{ o}$$

$$n = \frac{W - C}{C + d_b}$$

$$n_r = n - 1$$

$$V_a = \frac{Q}{[(W - d_b)h]}$$

$$V_r = Q/(A - A_r)$$

$$A_r = n d_b h$$

$$h_L = 1/k * [(V_r^2 - V_a^2)/2g]$$

$$h_1 = \beta \left(\frac{W}{b}\right)^{\frac{4}{3}} hv \cdot \text{sen } \theta$$

(ecuación de Kirshemer)

$$h_v = V_a^2/2g$$

$$A_R = B_c \frac{L}{L + b} \cdot \left(1 - \frac{G}{100}\right)$$

Dónde, A, área del canal $[m^2]$, ancho del canal $[m]$, tirante hidráulico $[m]$, V vel. Antes de la reja $[m/s]$, Q caudal $[m^3/s]$, h_L pérdida hidráulica $[m]$, β para barras circulares 1.79. d_b espesor de barra $[m]$, C=claro de

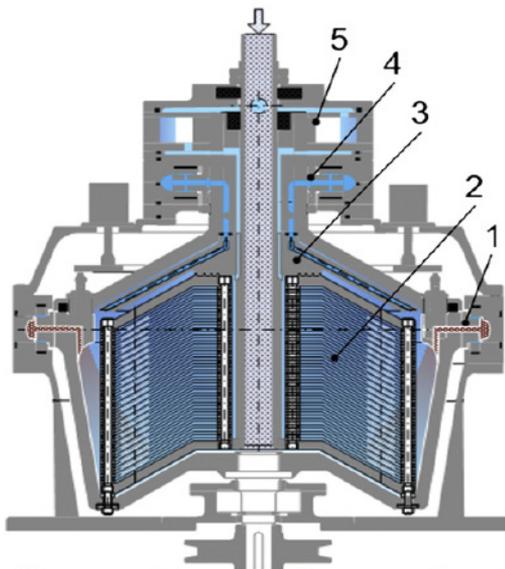
barras [m], h_v =altura de vel de flujo aproximación [m], Θ =ángulo de la rejilla horizontal, C = claro de barras (apertura), n = nº de espacios, $n-1$ = nº de barras, A_R área útil del canal en la zona de la rejilla [m²], B cancho del canal [m], L espacio entre barrotos [m], b ancho de barrotos [m], G grado de colmatación asumido 30%. A_i área de rejillas [m²]

Aplicando para un caudal de 50 m³/h (caudal utilizado para cultivo de Lolium con un área de 70 hectáreas), se obtuvo una caída de presión de 19.433 mm, una velocidad después de las barras de 0.517 m/s y 241 barras de 0.6 cm espaciados a 2 mm. Las dimensiones del canal son de 0.8*1.5 m y una inclinación de 45°.

Centrifugación

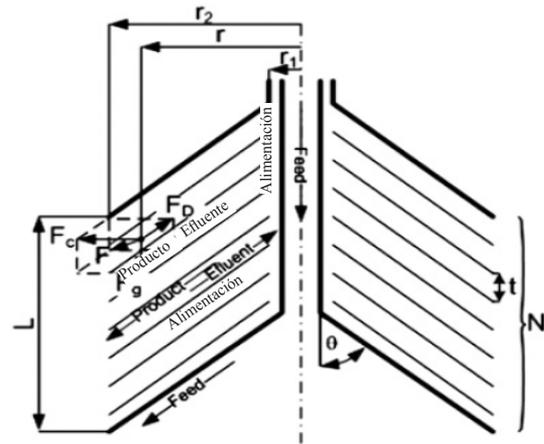
Para esta consideración se aplicará el diseño de centrífuga de platos Fig. 2 (considerando que no existirán sólidos mayores a 2 mm) de Batalović, (2011):

Figura 2. Disposición de centrífuga de sólidos, 1) Alimentación con bomba de vacío, 2) discos, 3) bomba, 4) bomba para agua, 5) motor regulador



Las partículas por diferencia de densidad se van separando de la fase acuosa, estas quedan atrapadas en el diámetro mayor controlando su densidad con el flujo, la bomba centrípeta hace que el agua sea atrapada y el aire queda en el centro, ilustrado en los diagramas de las Fig. 2 y 3.

Figura 3. Diagrama de fuerzas en los platos de la centrífuga



Cálculos para el equipo de centrifugado

$$C_c = \frac{(\rho_s - \rho_w) \cdot d_s^2}{18 \cdot \eta}$$

$$C_c = \left(\frac{r\omega}{g}\right) \cdot C_g = G \cdot C_g$$

$$q_t = C_g \cdot \Sigma$$

$$\Sigma = \left(\frac{V}{L}\right) \cdot \frac{\omega^2 \cdot r_2}{g}$$

$$d_{p1} = \left(\frac{18 \cdot \eta \cdot q_t}{\Sigma(\rho_s - \rho_w) \cdot g}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$q = \mu \cdot C_g \cdot \Sigma = (0.1 - 0.6) \cdot q_t$$

$$h = 75 \cdot \frac{q^{0.0527} \cdot v^{0.155}}{\omega^{0.628} \cdot t^{0.373} \cdot r_1^{0.161}}$$

$$C_r = C_1 \cdot \left(\frac{r_1}{r}\right)^5$$

$$D_{p2} = \left(\frac{6}{\omega}\right) \cdot \left(\frac{K \cdot \eta}{\rho_s - \rho_w}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$K = \frac{2 \cdot q \cdot r_1^2 \cdot N \cdot \tan\Theta}{\pi \cdot r_1^3 \cdot (r_2^4 - r_1^4)}$$

$$A = 2 \cdot \pi \cdot r_2 \cdot L$$

$$L = N \cdot t$$

$$d_{p3} = \left(\frac{9 \cdot \eta \cdot q_t}{\pi \cdot r_2^2 \cdot L \cdot \omega \cdot (\rho_s - \rho_w)} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\eta_m = \eta_w \left[1 + \frac{2 \cdot C_m}{\left(1 + 1.2 C_M^{\frac{2}{3}} \right)^2} \right]$$

$$\delta_{l,min} = 3.71 \sqrt{V/\omega}$$

$$\delta_{T,min} = 0.525 \left(\frac{V}{r^2 \omega} \right)^{\frac{1}{5}}$$

$$\delta_{opt} = 2 \cdot \delta_{min} + 3d_2$$

$$C_s = 2 \cdot \sqrt{\frac{v}{\lambda} \cdot \omega^2 \cdot r^2 \cdot \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}}$$

$$q = 2 \cdot \pi \cdot \mu \cdot N \cdot r_2 \cdot C_s \cdot \delta_{L,min}$$

Suponiendo datos ρ_s densidad de sólidos [2200 g/L], ρ_w densidad del agua [1000 g/L], d_s diámetro de partícula [0.0005 m], r radio vector de la partícula [0.1 m], η [0.001 P·s], ω vel. Angular [209.4 s⁻¹], V volumen del motor [0.0021 m³], r_2 radio vector de los productos [m], L longitud [m], C_c , vel. De sedimentación [m/s], C_g vel. De asentamiento [m/s], relación de flujo de alimentación, d_{p1} diámetro crítico de la partícula, q capacidad de remoción, h espesor vertical, Cr cambio de vel. En partículas gruesas, d_{p2} diámetro crítico [m], A superficie [m²], η_m viscosidad cuando en la mezcla domina las partículas [Pa·s], δ_l T, valores mínimos de espesores laminar y turbulento, δ_{opt} espesor óptimo [m], q caudal de separación de alimentación [m³/s].

Aplicando los cálculos considerando $\mu=0.5$ (coeficiente de corrección de caudal teórico), 15 platos, 2 mm espesor del espacio, 0.02 m radio vector del ingreso, $\delta_{l,min}$ salió 0.038 m, con un caudal de 0.047 m³/s.

Dimensionamiento de reactor para procesos de oxidación avanzada

$$[C] = [C_o] \cdot e^{-k't}$$

$$[C]/[C_o]=1-\%eficiencia/100$$

$$\tau = -\frac{\ln\left(\frac{[C]}{[C_o]}\right)}{k'}$$

$$k'' = k' \cdot \frac{\tau}{D}$$

$$V = Q \cdot \tau$$

$$L_{eq} = \frac{V}{\pi(d_{qs} \cdot OP + OP^2)}$$

$$S_{exp} = L_{eq} \cdot \pi \cdot (d_{qs} + 2OP)$$

$$Aplicado_{UV} = \frac{100^3 \cdot I_{ef} \cdot S_{exp}}{\%T_{qs} \cdot \%T_{ef} \cdot (100 - UV_{el})}$$

$$I_{ef} = \frac{D}{\tau}$$

$$N_{UV} = N_{qs} = \frac{Aplicado_{UV}}{Lamp_{UV}}$$

$$V_{total} = V + \frac{N_{qs} \cdot \pi \cdot (d_{out})^2 \cdot L_{UVnet}}{4}$$

$$d_r = \left(\frac{4 \cdot V_{total}}{\pi \cdot L_{UV}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\frac{L_{uvnet}}{d_r} > 3$$

C conc. Final [mg/L], C_o conc. Inicial [mg/L], k constante cinética 0.0334s⁻¹, THR tiempo de residencia 0.538 h considerando 30 min más el tiempo de degradación por la cinética, D dosis [120204 J/m²], D_{qs} diámetro de lámpara 2.6 cm y espacio entre el foco y pared 3.5 cm, transparencia de 90%, pérdida de intensidad del 20%, llegando a 8882 tubos de 15 W de energía UV a 254 nm, de 1.2 m, d_r con un diámetro de 31.8 cm, y un $L/d_r=3.776$, aplicando una longitud equivalente L_{eq} de 4614.7 m.

Flujo a través de la Membrana

$$Sh = A \cdot (Re)^\alpha \cdot (Sc)^\beta$$

$$Sh = \frac{k \cdot d_h}{D}$$

$$d_h = 4 \frac{a \cdot b}{2 \cdot (a + b)}$$

$$Sc = \frac{\mu}{\rho \cdot D}$$

$$Re = \frac{d_h \cdot v \cdot \rho}{\mu}$$

$$J = \frac{D}{\delta} \cdot \ln\left(\frac{CG}{CB}\right) = k \cdot \ln\left(\frac{CG}{CB}\right)$$

T temperatura [45°C], d densidad 1030 g/L, viscosidad 1 cp, D difusividad de sólidos supuestos 7E-6 cm²/s, n° de fibras 660, de diámetro 1.1 mm, pueden soportar un caudal de 0.833 L/min,

Llegando a un número de Sherwood (Sh) de 6.67984, por lo que la constante de transferencia de masas 15.30 L/m²h, y un flujo de 19.79 m³/m²h, dando un total de 7 módulo de filtración.

El tren de tratamientos se pudo consolidar considerando a los procesos de oxidación avanzada como principal etapa, esté consiste en un sistema de rejillas para eliminar partículas mayores 2 mm, una centrífuga de sólidos para eliminar la mayor cantidad de partículas que afecten al tratamiento de oxidación y dispersen la luz UV, procesos de oxidación avanzada foto-Fenton con relaciones molares de: 2 a 2.5 de [H₂O₂]/[DQO], 1/100 [Fe²⁺]/[H₂O₂], 19 w de UV a 254 nm y un tiempo de residencia de aproximadamente 30 minutos, tomando en cuenta más el tiempo que tarda la reacción química en tratar los contaminantes de forma teórica y terminando con un sistema de membranas de ultrafiltración.

CONFLICTO DE INTERÉS

El autor declara que no tiene conflictos de interés con la presente investigación.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento especial a la Unidad de Investigación Ciencia y Tecnología de la Escuela Militar de Ingeniería U.A. Cochabamba y a sus laboratorios.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. Balletero, Arroyo Victor, and Mejía Abel, "Cap 3. Contexto hídrico en América Latina: una región con alta disponibilidad de agua y una escasez creciente," in *Inseguridad Económica del Agua en Latinoamérica: de la abundancia a la inseguridad*, 2015, pp. 14–16. doi: Depósito Legal: lfi74320153002709.
- [2] M. Á. Ontiveros Mollinedo, "Cap.6 Resultados, Cap. 7 y Anexos," in *La economía del cambio climático en Bolivia: Impactos en los Recursos Hídricos.*, vol. Monografía No.. 186, C. E. Ludeña and A. Sanchez, Eds., Washington, DC.: Banco Interamericano de Desarrollo, 2014, pp. 22–95.
- [3] R. Toledo M. and D. Amurrio D., "Evaluación de la calidad de las aguas del río Rocha en la jurisdicción de SEMAPA en la provincia Cercado de Cochabamba-Bolivia," *RevActaNova*, vol. 3, no. 3, pp. 521–542, 2006.
- [4] R. Ampuero A., "Re-uso de aguas residuales en la agricultura: Una realidad en los márgenes del Río Rocha en el Valle de Cochabamba, Bolivia," in *Comisión para la Gestión Integral del Agua en Bolivia*, S. Espinoza A., Ed., Cochabamba, 2009, pp. 125–126. [Online]. Available: www.aguabolivia.org.
- [5] A. Arnold, "Wastewater treatment alternatives for an urban neighborhood in Cochabamba, Bolivia A single-case study of a neighborhood and its wastewater treatment system," Chalmers University of Technology, Gothenburg, 2014.
- [6] S. Jacobson and I. Sekizovic, "Physico-chemical evaluation of the water quality in Rocha River A qualitative and comparative analysis including aspects of social and environmental factors," Lund University, Lund, 2019.

- [7] A. G. Gutierrez-Mata et al., "Recent Overview of Solar Photocatalysis and Solar Photo-Fenton Processes for Wastewater Treatment," *International Journal of Photoenergy*, vol. 2017. Hindawi Limited, 2017. doi: 10.1155/2017/8528063.
- [8] O. D. Arefieva, M. S. Vasilyeva, E. V. Ermolenko, and A. V. Bychkova, "Photo-fenton process of oxidative destruction of rice husk alkaline hydrolysates lignin," *Water Pract Technol*, vol. 14, no. 2, pp. 391–398, Jun. 2019, doi: 10.2166/wpt.2019.023.
- [9] M. C. Collivignarelli, R. Pedrazzani, S. Sorlini, A. Abbà, and G. Bertanza, "H₂O₂ based oxidation processes for the treatment of real high strength aqueous wastes," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 9, no. 2, 2017, doi: 10.3390/su9020244.
- [10] W. S. Kuo and C. L. Wu, "Treatment of color filter wastewater by Fresnel lens enhanced solar photo-Fenton process," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2012, 2012, doi: 10.1155/2012/679206.
- [11] E. S. Elmolla and M. Chaudhuri, "Photo-Fenton Treatment of Antibiotic Wastewater," *Nature Environment and Pollution Technology*, vol. 9, no. 2, pp. 365–370, 2010, [Online]. Available: www.neptjournal.com.
- [12] A. R. Dincer, N. Karakaya, and Y. Gunes, "Removal of cod from oil recovery industry wastewater by the advanced oxidation processes (AOP) based on H₂O₂," 2008.
- [13] X. R. Xu, X. Y. Li, X. Z. Li, and H. Bin Li, "Degradation of melatonin by UV, UV/H₂O₂, Fe²⁺/H₂O₂ and UV/Fe²⁺/H₂O₂ processes," *Sep Purif Technol*, vol. 68, no. 2, pp. 261–266, Aug. 2009, doi: 10.1016/j.seppur.2009.05.013.
- [14] N. De la Cruz, J. Giménez, S. Esplugas, D. Grandjean, L. F. De Alencastro, and C. Pulgarín, "Degradation of 32 emergent contaminants by UV and neutral photo-fenton in domestic wastewater effluent previously treated by activated sludge," *Water Res*, vol. 46, no. 6, pp. 1947–1957, Apr. 2012, doi: 10.1016/j.watres.2012.01.014.
- [15] T. Khodadadi, E. Solgi, S. Mortazavi, and H. Nourmoradi, "Comparison of advanced oxidation methods of fenton, UV/fenton, and O₃ /fenton in treatment of municipal wastewater," *Desalination Water Treat*, vol. 206, pp. 108–115, 2020, doi: 10.5004/dwt.2020.26373.
- [16] M. I. Badawy, M. Y. Ghaly, and T. A. Gad-Allah, "Advanced oxidation processes for the removal of organophosphorus pesticides from wastewater," *Desalination*, vol. 194, no. 1–3, pp. 166–175, Jun. 2006, doi: 10.1016/j.desal.2005.09.027.
- [17] T. Reutelshöfer and L. Guzmán, *Guía para la toma de muestra de aguas residuales*. La Paz: Servicio Nacional para la Sostenibilidad de Servicios en Saneamiento Básico, 2015.
- [18] M. A. Hughes, "4 Coagulation and flocculation Part I," in *Chemical Engineering Series*, L. Svarovsky, Ed., 1977, pp. 104–129.
- [19] Y. Lorenzo A., "Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación," *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, vol. 15, no. 2, pp. 10–17, 2006, [Online]. Available: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223120664002>.
- [20] Jorge. Arboleda Valencia, "Teoría y práctica de la purificación del agua," Mac-Graw Hill, 2000.
- [21] K. Nasr Esfahani, M. Pérez-Moya, and M. Graells, "Modelling of the photo-Fenton process with flexible hydrogen peroxide dosage: Sensitivity analysis and experimental validation," *Science of the Total Environment*, vol. 839, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.155941.
- [22] A. Cabrera Reina, L. Santos-Juanes Jordá, J. L. García Sánchez, J. L. Casas López, and J.

- A. Sánchez Pérez, “Modelling photo-Fenton process for organic matter mineralization, hydrogen peroxide consumption and dissolved oxygen evolution,” *Appl Catal B*, vol. 119–120, pp. 132–138, May 2012, doi: 10.1016/j.apcatb.2012.02.021.
- [23] CONAGUA, *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales*. 2015. [Online]. Available: www.conagua.gob.mx.
- [24] V. Batalović, “Centrifugal separator, the new technical solution, application in mineral processing,” *Int J Miner Process*, vol. 100, no. 3–4, pp. 86–95, Sep. 2011, doi: 10.1016/j.minpro.2011.05.007.
- [25] M. Hao, Z. Bai, H. Wang, and W. Liu, “Removal of oil from electric desalting wastewater using centrifugal contactors,” *J Pet Sci Eng*, vol. 111, pp. 37–41, Nov. 2013, doi: 10.1016/j.petrol.2013.10.017.
- [26] J. C. Mierzwa, R. Rodrigues, and A. C. S. C. Teixeira, “Chapter 2 - UV-Hydrogen Peroxide Processes,” in *Advanced Oxidation Processes for Waste Water Treatment*, S. C. Ameta and R. Ameta, Eds., Academic Press, 2018, pp. 13–48. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-810499-6.00002-4>.
- [27] J. C. (John C. Crittenden, K. J. Howe, D. W. Hand, G. Tchobanoglous, and R. Rhodes. Trussell, “Filtration membrane,” in *Principles of water treatment*, 3rd ed., 2012, pp. 281–326.



Carlos Marcelo Camacho Caero.

Nació en Cochabamba - Bolivia, es Ingeniero Químico titulado de la Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba - Bolivia. Tiene Maestría Científica en Innovación y Desarrollo ASDI-UMSS. Es Encargado de Laboratorio de Química de la Unidad de Investigación Ciencia y Tecnología de la Unidad Académica Cochabamba.