

# Llamkasun

*Trabajemos*

Diciembre - 2020




Degradación de la carga orgánica de lixiviado maduro mediante proceso de oxidación avanzada H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV/TiO<sub>2</sub> en reactor anular, Junín – Perú

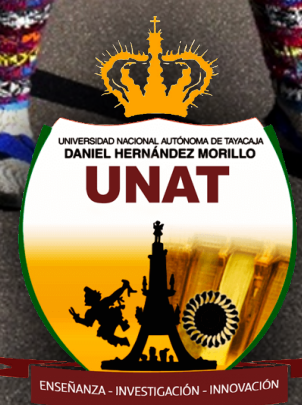


Degradation of the organic charge of mature leachate by advanced oxidation process H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV/TiO<sub>2</sub> in annular reactor, Junín – Peru



Degradation of the organic charge of mature leachate by advanced oxidation process H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV/TiO<sub>2</sub> in annular reactor, Junín – Peru



10.47797/llamkasun.v1i3.22 



## Degradación de la carga orgánica de lixiviado maduro mediante proceso de oxidación avanzada $H_2O_2/UV/TiO_2$ en reactor anular, Junín – Perú

## Degradation of the organic charge of mature leachate by advanced oxidation process $H_2O_2/UV/TiO_2$ in annular reactor, Junín – Peru

## Degradação da carga orgânica do lixiviado maduro através do processo de oxidação avançado $H_2O_2 / UV / TiO_2$ em reator anular, Junín - Peru

José Luis Tito Huarcaya   
Universidad Nacional Agraria de la Selva. Perú.  
Luis Eduardo Ore Cierto   
Universidad Nacional Agraria de la Selva. Perú.

### RESUMEN

La presente investigación se ha desarrollado con la finalidad de degradar la carga orgánica de lixiviado maduro mediante proceso de oxidación avanzada  $H_2O_2/UV/TiO_2$  en reactor anular fotocatalítico del relleno sanitario de la Municipalidad Provincial de Concepción. El objetivo es determinar la degradación de la carga orgánica. El proceso fotocatalítico se conformó con el  $TiO_2$  como catalizador, el  $H_2O_2$  como oxidante y lámpara UV como fuente de radiación. Mediante el diseño de compuesto central (DCC) de la metodología superficie de respuesta (MSR) se elaboró el diseño estadístico con tres factores: concentración de  $H_2O_2$ , pH y tiempo de operación del equipo; cada factor con cinco niveles,  $H_2O_2$  (2600, 2800, 3000, 3500 y 4400 mg/L), pH (2.6, 2.8, 3, 3.2 y 3.36) y tiempo (11, 15, 20, 25 y 29 minutos). Se utilizó la metodología superficie de respuesta (MSR) para la optimizar el proceso de degradación. Los parámetros óptimos para la degradación de la carga orgánica de lixiviado maduro son los siguientes:  $H_2O_2$  (2600 mg/L), pH (3.3) y tiempo (20 minutos). La dinámica de fluidos computacional (CFD) muestra que la distribución de velocidad de flujo es homogénea, y la distribución de radiación máxima es  $278W/m^2$  y la mínima es  $2W/m^2$ .

**Palabras clave:** Lixiviado, oxidación avanzada, reactor fotocatalítico, metodología superficie de respuesta (MSR), dinámica de fluido computacional (CFD).

RECIBIDO : 05-09-2020  
ACEPTADO : 10-12-2020

DOI: <https://doi.org/10.47797/llamkasun.v1i3.22>



**ABSTRACT**

The present investigation has been developed with the purpose of degrading the organic load of mature leachate through the advanced oxidation process  $H_2O_2/UV/TiO_2$  in the photocatalytic ring reactor of the sanitary landfill of the Provincial Municipality of Concepción. The objective is to determine the degradation of the organic load. The photocatalytic process was conformed to  $TiO_2$  as a catalyst,  $H_2O_2$  as an oxidant and UV lamp as a source of radiation. Through the design of the central composite (DCC) of the response surface methodology (MSR), the statistical design was elaborated with three factors:  $H_2O_2$  concentration, pH and time of operation of the equipment; each factor with five levels,  $H_2O_2$  (2600, 2800, 3000, 3500 and 4400 mg/L), pH (2.6, 2.8, 3, 3.2 and 3.36) and time (11, 15, 20, 25 and 29 minutes). The response surface methodology (MSR) was used to optimize the degradation process. The optimum parameters for the degradation of the organic load of mature leachate are the following:  $H_2O_2$  (2600 mg/L), pH (3.3) and time (20 minutes). The computational fluid dynamics (CFD) shows that the distribution of flow velocity is homogeneous, and the maximum radiation distribution is 278W/m<sup>2</sup> and the minimum is 2W/m<sup>2</sup>.

**Key words:** Leachate, advanced oxidation, photocatalytic reactor, surface response methodology (MSR), computational fluid dynamics (CFD).

**RESUMO**

Esta pesquisa foi desenvolvida com o objetivo de degradar a carga orgânica do lixiviado maduro por meio de um processo de oxidação avançado  $H_2O_2 / UV / TiO_2$  em um reator fotocatalítico anular do aterro sanitário do Município Provincial de Concepción. O objetivo é determinar a degradação da carga orgânica. O processo fotocatalítico foi composto por  $TiO_2$  como catalisador,  $H_2O_2$  como oxidante e uma lâmpada UV como fonte de radiação. Através do delineamento do composto central (DCC) da metodologia de superfície de resposta (MSR), o delineamento estatístico foi elaborado com três fatores: concentração de  $H_2O_2$ , pH e tempo de operação do equipamento; cada fator com cinco níveis,  $H_2O_2$  (2600, 2800, 3000, 3500 e 4400 mg / L), pH (2,6, 2,8, 3, 3,2 e 3,36) e tempo (11, 15, 20, 25 e 29 minutos). A metodologia de superfície de resposta (MSR) foi usada para otimizar o processo de degradação. Os parâmetros

ideais para a degradação da carga orgânica do lixiviado maduro são os seguintes: H2O2 (2600 mg / L), pH (3,3) e tempo (20 minutos). A dinâmica de fluidos computacional (CFD) mostra que a distribuição da velocidade do fluxo é homogênea, e a distribuição máxima da radiação é 278W / m<sup>2</sup> e a mínima é 2W / m<sup>2</sup>.

**Palavras-chave:** Lixiviado, oxidação avançada, reator fotocatalítico, metodologia de superfície de resposta (MSR), dinâmica de fluidos computacional (CFD).

## INTRODUCCIÓN

El Perú cuenta con 35 rellenos sanitarios a nivel nacional (MINAM, 2019) que brindan servicio a 114 municipalidades distritales de un total de 1654, el resto de las municipalidades disponen los residuos sólidos en botaderos informales que hasta la fecha el OEFA (2019) ha determinado que existe 1585 botaderos informales a nivel nacional.

Tanto en los rellenos sanitarios como en los botaderos se produce lixiviados. Los lixiviados son líquidos oscuros que se producen por la descomposición de la materia orgánica y el agua que ingresa al relleno por la precipitación, los cuales, al fluir, disuelven sustancias y arrastran partículas contenidas en los residuos. Pueden llegar a los cuerpos de agua por medio del arrastre de la lluvia o cuando se infiltran en el subsuelo, afectando los ecosistemas acuáticos. Entre las sustancias especialmente peligrosas para el medio

ambiente presentes en los lixiviados están los compuestos orgánicos halogenados, los PCBs (policlorobifenilos) y los metales pesados. Además, presentan altas concentraciones de nitrógeno amoniacal, cloruros y sulfatos.

Los procesos de oxidación avanzada (POAs) son una alternativa para el tratamiento de lixiviado, especialmente para los compuestos recalcitrantes presentes en el lixiviado. Sin embargo, en el Perú existe muy poca información sobre el tratamiento de lixiviado mediante este proceso, por tanto, es preciso investigar la capacidad de degradación del lixiviado mediante los POAs. Además, el lixiviado que se genera en el relleno sanitario de la Municipalidad Provincial de Concepción no cuenta con tratamiento y está almacenado aproximadamente durante ocho años.

## METODOLOGÍA

### Ubicación del lugar de ejecución

El presente trabajo se desarrolló en el laboratorio de suelos de la Escuela Profesional de Conservación de Suelos y Agua, Facultad de recursos Naturales de la Universidad Nacional Agraria de la Selva. La ciudad universitaria se encuentra ubicada: coordenadas geográficas, Latitud. 9°17'43'' y longitud 75°59'51 y coordenadas UTM 8958032 N, 390308 S.

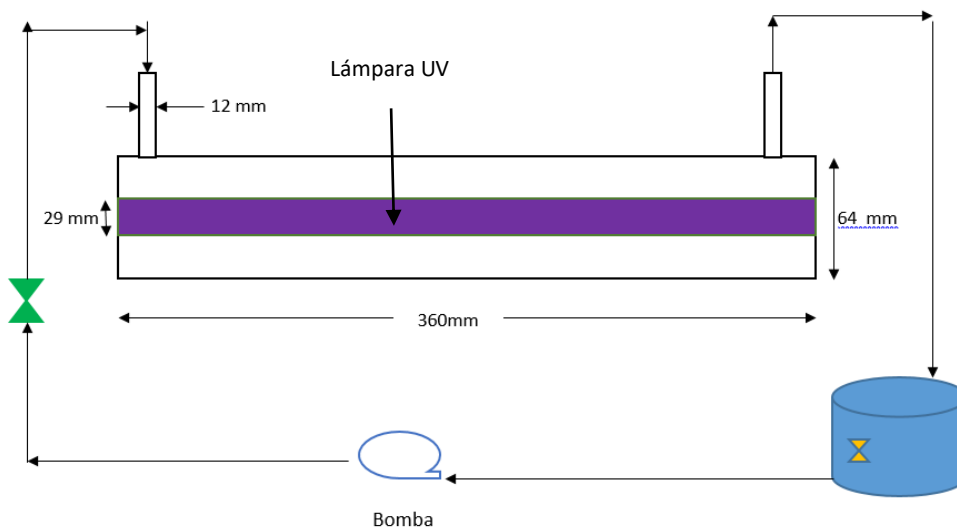
### Reactor experimental

Para determinar la degradación de la carga orgánica del lixiviado y la simulación CFD en reactor anular fotocatalítico con dióxido de titanio inmovilizado se construyó un reactor experimental con las mismas dimensiones según el modelo geométrico que se muestra en la Figura 1.

La técnica utilizada para inmovilización fue el tratamiento térmico, según Kumar y Bansal (2014). El reactor anular presenta las siguientes características: diámetro exterior de 64 mm, 29 mm de diámetro interior, longitud total de 360 mm y, 12 mm de entrada y de salida en forma perpendicular al reactor principal. El volumen iluminado es de 3681221.4mm<sup>3</sup>. Funciona en un circuito cerrado con recirculación con dos tanques de almacenamiento (1L de volumen cada uno), un tanque de muestreo y un tanque de bombeo, accionado por una bomba peristáltica con caudal constante de 75 mL/minuto. La iluminación UV se realizó con una lámpara UV-C de 15W General Electric, 23 mm de diámetro, 370 mm de longitud con una emisión de 254 nm. La lámpara se colocó de forma concéntrica en el interior del reactor protegido por un tubo de cuarzo con diámetro de 27 mm y longitud total de 360 mm.

**Figura 1**

*Esquema del reactor anular*



## Método

El muestreo del lixiviado se realizó de acuerdo al Protocolo de monitoreo de la calidad de los Recursos Hídricos, Autoridad Nacional del Agua - DGCRH. Para determinar el pH se utilizó el pH-metro HANNA. De acuerdo al método 4500 H+B, de APHA-AWWA-WEF (2017). La cantidad de materia orgánica presente en el lixiviado se determinó mediante el índice de permanganato, para ello se utilizó el método de oxidabilidad al permanganato este método se encuentra en la norma española UNE EN ISO 8467, elaborada por el Comité técnico AEN/CTN 77 Medio Ambiente (Rojas, 2008).

## Diseño experimental y optimización

Para la aplicación de la metodología superficie de respuesta se utilizó el diseño de compuesto central (DCC), método utilizado para la optimización de la degradación de la carga orgánica del lixiviado. Los factores con tres niveles (-1, 0, +1) usado por DCC para la construcción del modelo de superficie de respuesta de segundo orden. El diseño consistió en tres tipos de puntos:  $2^k$  puntos cúbicos,  $2k$  puntos axiales, y  $n^o$  puntos centrales. Para el presente caso, se realizó siete replicas en el punto central, y tres factores (k) que en total son 21 corridas experimentales. La distancia de los extremos al punto central ( $\alpha$ ) fue de 1.8 (Box *et al.* 2008). Las

variables en el estudio se identificaron con:

concentración

de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (X1), pH (X2), y tiempo (X3). El porcentaje de degradación de la carga orgánica (Y) se determinó mediante la siguiente ecuación,

$$Y = \left[ \frac{C_0 - C_t}{C_0} \right] \times 100$$

Donde C<sub>0</sub> es la carga orgánica inicial y C<sub>f</sub> es la carga orgánica final, después del tratamiento fotocatalítico. Los códigos y los valores reales de los factores se muestran en el Tabla 01.

**Tabla 1**

*Codificación de los niveles reales de los factores*

Factores	Código de los niveles de los factores				
	-α	-1	0	1	+α
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg/L)	2600	3000	3500	4000	4400
pH	2.64	2.8	3	3.2	3.36
Tiempo (minutos)	11	15	20	25	29

El modelo de regresión, y los resultados se analizaron con el software Design Expert

versión 11. La respuesta (Y) se relacionaron con el modelo polinomial de segundo orden.

$$Y = b_0 + \sum_{j=1}^k b_j X_j + \sum_{u,j=1}^k b_{uj} X_u X_j + \sum_{j=1}^K b_{jj} X_j^2 \quad u \neq j$$

Donde b<sub>0</sub> + b<sub>j</sub> (j=1, 2 y3), b<sub>uj</sub> (j=1, 2 y 3) y b<sub>jj</sub> (i= 1, 2 y 3; j = 1, 2 y 3; i<j) son intersección, lineal, cuadrada e interacción de coeficiente de regresión, respectivamente.

El análisis de varianza (ANOVA) se realizó de acuerdo al modelo propuesto. La significancia estadística se evaluó con el valor de F (Variación de Fisher) para un nivel de significancia α=0.05.

**Modelización y simulación CFD**

En el presente estudio, se asume que el fluido es newtoniano, incomprensible e isotérmico con propiedades físicas constantes. Las ecuaciones de conservación de momento se resolvieron utilizando el software comercial ANSYS Fluent. las ecuaciones que gobierna el sistema son los siguientes:

- Ecuación de la continuidad:

$$\nabla \cdot (\rho U) = 0$$

- Ecuación conservación de momento:



$$\nabla \cdot (\rho U U) = -\nabla P - \nabla \cdot \tau$$

- Con el medidor de tensor:

$$\tau = \mu(\nabla U + \nabla U^T) - \frac{3}{2}\mu\nabla \cdot U I$$

En las ecuaciones,  $\rho$  es la densidad,  $U$  es la velocidad,  $P$  es la presión,  $\tau$  Es el medidor

$$\frac{dI_\lambda(S, \Omega)}{ds} = -\kappa_\lambda I_\lambda(S, \Omega) - \sigma_\lambda I_\lambda(S, \Omega) + \frac{\sigma_\lambda}{4\pi} \int_0^{4\pi} p(\Omega' \rightarrow \Omega) I_\lambda(S, \Omega') d\Omega'$$

Donde  $I_\lambda(S, \Omega)$  es la intensidad de los fotones con longitud  $\lambda$ , propagada en la dirección  $\Omega$ ,  $\kappa_\lambda$  es el coeficiente de absorción volumétrico,  $\sigma_\lambda$  es el coeficiente de dispersión volumétrico, y  $p(\Omega' \rightarrow \Omega)$  es la función de fase, que describe la distribución direccional de la radiación dispersada.

El primer término de la derecha es la radiación absorbida, el segundo término es la dispersión de la radiación y el tercer término es la ganancia de energía debido a la dispersión de la radiación.

del tensor,  $\mu$  es la viscosidad molecular e  $I$  es unidad de tensor.

Para la simulación de la distribución de radiación en el reactor fotocatalítico se resuelve la ecuación de transferencia radiactiva (RTE) que se define de la siguiente forma:

## RESULTADOS

### Determinación de los parámetros fisicoquímicos del lixiviado

En la Tabla 02 se presenta los valores de los parámetros en estudio para el lixiviado maduro del Centro Eco turístico de Protección Ambiental “Santa Cruz” (CESPAC) de la Municipalidad Provincial de Concepción departamento Junín.

**Tabla 2**

*Parámetros fisicoquímicos del lixiviado*

Parámetro	Unidad
Oxígeno disuelto	5.60 (mg/L)
Índice de permanganato	2666.67 (mg/L)
pH	7.6

Los valores determinados de los parámetros corresponden a un lixiviado maduro, de acuerdo

a la clasificación de lixiviados realizado por Kurniawan *et al.* (2005). De acuerdo a la





información proporcionada por la Gerencia de Ecología y Medio Ambiente Ambiental, el lixiviado utilizado en la investigación tiene una antigüedad de 8 años aproximadamente.

La concentración de oxígeno disuelto del lixiviado favorece el proceso fotocatalítico, ya que, como menciona Cáceres (2002), el oxígeno disuelto acepta los electrones que se producen en la superficie del catalizador, Tanto el oxígeno disuelto como el agua son esenciales en el proceso, no existiendo degradación alguna en su ausencia.

**Modelación y optimización del proceso H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV/TiO<sub>2</sub> mediante la metodología superficie de respuesta**

La modelización y optimización del proceso H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV/TiO<sub>2</sub> consta de cuatro etapas, los cuales se presentan a continuación:

**Determinación del porcentaje de degradación de materia orgánica**

La degradación de la materia orgánica se presenta en la columna “% degradación observada” de la Tabla 03, donde el porcentaje mínimo de degradación es 83.96%, el máximo 94.60% y una media de 87.56%.

Tabla 3

Valor observado y predicho por el modelo MSR

RUN	Niveles codificados de las variables			Niveles de las actuales variables			Respuesta (% degradación)	
	X1	X2	X3	X1	X2	X3	Observado	Predicho
1	-1	-1	-1	3000	2.8	15	89.58	89.43
2	1	-1	-1	4000	2.8	15	89.93	90.71
3	-1	1	-1	3000	3.2	15	86.73	86.27
4	1	1	-1	4000	3.2	15	84.62	84.97
5	-1	-1	1	3000	2.8	25	90.19	89.47
6	1	-1	1	4000	2.8	25	83.84	83.93
7	-1	1	1	3000	3.2	25	94.60	93.45
8	1	1	1	4000	3.2	25	85.57	85.34
9	-α	0	0	2600	3	20	93.86	95.15
10	α	0	0	4400	3	20	90.19	89.41
11	0	-α	0	3500	2.64	20	87.58	87.39
12	0	α	0	3500	3.36	20	85.22	85.91
13	0	0	-α	3500	3	11	85.12	84.62
14	0	0	α	3500	3	29	83.96	84.96
15	0	0	0	3500	3	20	87.88	87.27
16	0	0	0	3500	3	20	86.90	87.27
17	0	0	0	3500	3	20	87.30	87.27
18	0	0	0	3500	3	20	87.30	87.27
19	0	0	0	3500	3	20	87.48	87.27
20	0	0	0	3500	3	20	86.96	87.27
21	0	0	0	3500	3	20	87.18	87.27

Donde: X1 (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> mg/L), X2 (pH) y X3 (tiempo en minutos)

En la investigación, el porcentaje medio de degradación de índice de permanganato es

87.56%, este resultado se encuentra en el rango determinado por Hassan *et al.* (2016),

ya que para un tratamiento de lixiviado con TiO<sub>2</sub>, irradiado con tres lámparas UV de 15W obtuvo una degradación de DQO que varía entre 76 - 92%.

Hassan *et al.* (2016) al realizar bajo condiciones de tratamiento de 2g/P25 TiO<sub>2</sub>, lámpara UV de 15 W a 254 nm de longitud de onda en un reactor batch a pH 4 obtuvo una tasa de degradación media de 60% de DQO, comparado con la media de la presente investigación es menor. Esta diferencia podría ser debido a la presencia de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y a condición mayor de acides tal como se aprecia en la Figura 03 de los resultados, el efecto del pH es mayor a pH 3.2 y la presencia de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> incrementa la degradación de la carga orgánica.

La presencia de metales pesados en lixiviado (Vilar, 2015), favorece la degradación de la

materia orgánica ya que mucho de estos metales son semiconductores y al ser iluminado con radiación absorben la energía de los fotones y crean el par electrón-hueco (e<sup>-</sup> y h<sup>+</sup>), los cuales se disocian en fotoelectrones libres en la banda de conducción y foto-huecos en la banda de valencia y se produce la reacción redox.

### Modelo de regresión y análisis de varianza

En la siguiente ecuación se presenta el modelo cuadrático de regresión en término de los factores codificados:

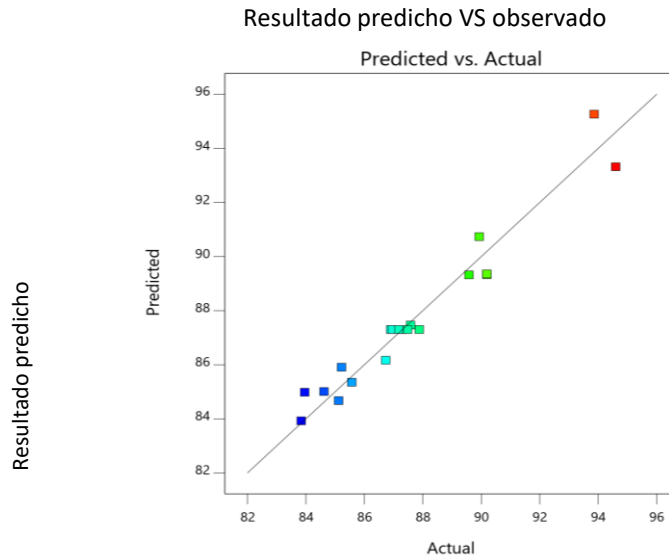
$$\%Degra = 87.21 - 1.7X_1 - 0.44X_2 - 0.1X_3 - 1.77X_1^2 - 0.22X_2^2 - 0.88X_3^2 - 0.64X_1 X_2 - 1.7X_1 X_3 + 1.79X_2 X_3$$

Donde X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub> y X<sub>3</sub> son los códigos de peróxido de hidrogeno, pH y tiempo. El modelo de regresión explica perfectamente los experimentos estudiados, como se puede ver en la Figura 02. El porcentaje de

degradación de carga orgánica vario entre 83% y 94%, y la predicción del modelo coincidió satisfactoriamente con estos resultados observados

**Figura 2**

*Valores predichos versus valores observados*



La Tabla 04 muestra que el modelo de degradación fotocatalítica de Resultado observado orgánica de lixiviado tiene un valor F de 22.04, con un valor de  $p < 0.0001$ , por lo que estadísticamente el modelo es altamente significativo, quiere decir entonces que de acuerdo a los resultados existe una probabilidad de 0.01%, que no represente el modelo. El coeficiente de determinación ( $R^2$ )

tiene un valor de 0.9475, por lo que el modelo de degradación fotocatalítica de Resultado observado orgánica, además, el 94.75% de las variaciones están explicadas por las variables dentro de estudio, y que sólo el 5.25% de las variaciones totales no pueden ser explicados por el modelo.

Tabla 4

*ANOVA de la superficie de respuesta del modelo cuadrático para % de degradación*

Fuente	Grado de libertad	Suma de cuadrados.	Media de cuadrado	Valor F	Valor p
Modelo	9	156.322	17.3692	22.04	<0.0001
Lineal	3	41.763	13.9210	17.67	<0.0001
Cuadrado	3	62.508	20.8359	26.44	<0.0001
Interacción de 2 factores	3	52.052	17.3506	22.02	<0.0001
Error	11	8.668	0.7880		

Falta de ajuste	5	8.011	1.6021	14.62	0.003
Error puro	6	0.657	0.1096		
<b>Total</b>	<b>20</b>	<b>164.990</b>			

$R^2=0.9475, R^2 \text{ (ajustado)} = 0.9045$

El modelo de regresión determinado tiene un alto valor de  $R^2$ , sin embargo, eso no implica necesariamente que el modelo de regresión sea eficiente. Según Montgomery (2004) agregar una variable a un modelo siempre aumenta el  $R^2$ , independientemente de si las variables adicionales son estadísticamente significativas o no. Por lo tanto, es posible que los modelos que tienen elevados valores de  $R^2$  pueden obtener malos resultados. Como  $R^2$  se incrementa al agregar términos a un modelo, frente a ello es preferible el uso de  $R^2$  ajustado. En general, el  $R^2$  ajustado no siempre aumenta a medida que las variables o términos se agreguen al modelo. Una gran diferencia entre  $R^2$  y  $R^2$  ajustado indica la inclusión de términos insignificantes para el modelo. En el presente estudio, el valor de  $R^2$

y  $R^2$  ajustado están lo suficientemente cerca como para sugerir una adecuada correlación entre la respuesta y variables independientes. En la Tabla 05 se presenta el ANOVA de los coeficientes del modelo cuadrático. El termino lineal X1, termino cuadrático (X1\*X1) y (X3\*X3) y, la interacción (X1\*X3) y (X2\*X3) son significativos al 5%. Todos los demás términos son insignificantes, los valores de p que presentan son mayores a 5%. Sin embargo, los términos insignificantes no se eliminan del modelo porque reduciría la dimensionalidad de la superficie de respuesta. A partir de los valores de los coeficientes del modelo de regresión, el orden en que afectan las variables independientes afectan la respuesta: H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (X1) > pH (X2) > tiempo (X3).

Tabla 5

ANOVA de los coeficientes del modelo de % de degradación

Término	Coefficiente	Error del coeficiente.	Valor T	Valor p
Constante	87.306	0.335	260.59	<0.0001
X1	-1.640	0.233	-7.03	<0.0001
X2	-0.433	0.233	-1.86	0.090
X3	0.086	0.233	0.37	0.718
X1*X1	1.546	0.206	7.50	<0.0001
X2*X2	-0.190	0.206	-0.92	0.376
X3*X3	-0.764	0.206	-3.71	0.003



X1*X2	-0.643	0.314	-2.05	0.065
X1*X3	-1.703	0.314	-5.42	<0.0001
X2*X3	1.787	0.314	5.70	<0.0001

Dónde: X1 (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> mg/L), X2 (pH) y X3 (tiempo en minutos)

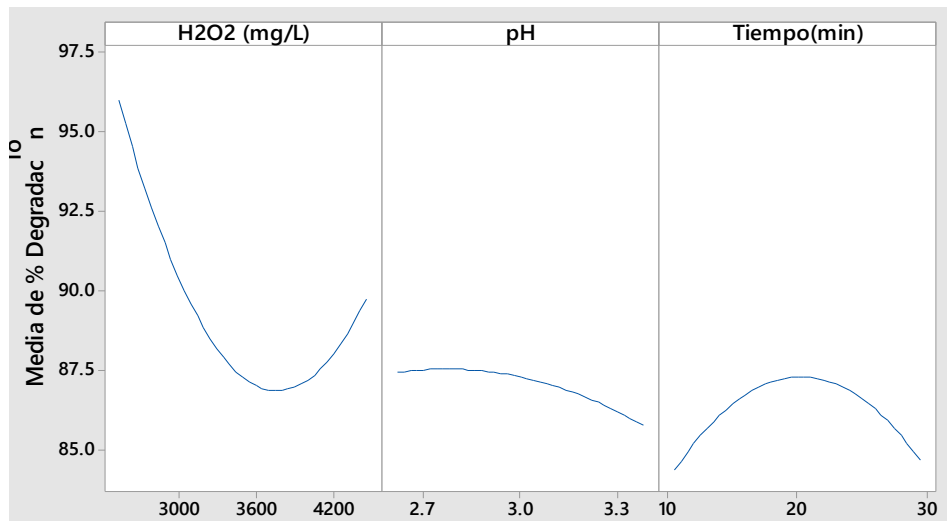
**Análisis gráfico del modelo**

La Figura 03 muestra los efectos principales de las tres variables independientes para porcentaje de degradación de materia orgánica en reactor anular. La variable H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

es la variable más importante que da una diferencia cercana a 8% en la respuesta, el segundo factor o variable más importante es el pH. Indica que los resultados gráficos están de acuerdo con los resultados estadísticos.

**Figura 3**

*Grafica de efectos principales para % de degradación*



La Figura 04 de superficie de respuesta y contorno, muestra el efecto simultaneo del peróxido de hidrogeno y pH. En ambas figuras se observa que para un pH de 3 a 3.3

y concentración de peróxido de hidrogeno de 2600 mg/L el porcentaje de degradación de la carga orgánica de lixiviado es superior al 95%.

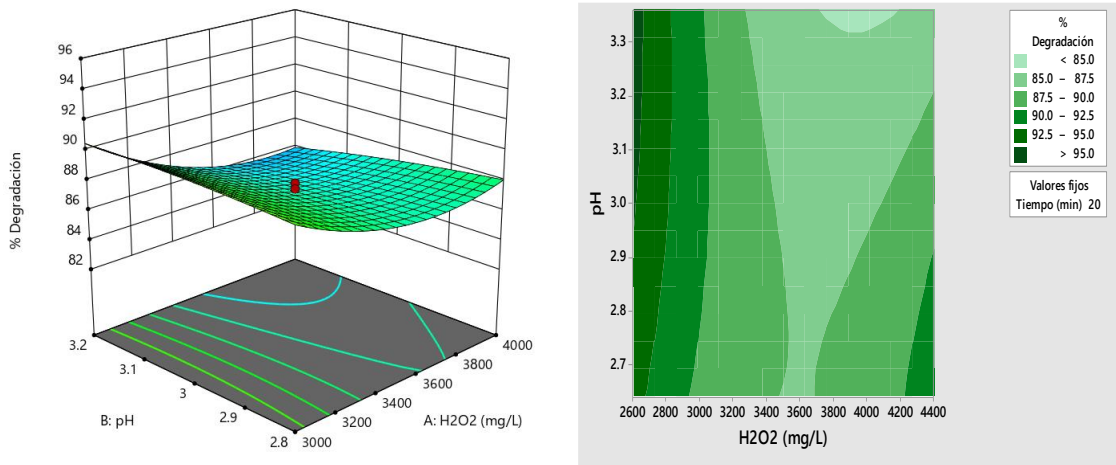


Figura 4. Superficie de respuesta (izquierda) y contorno de respuesta (derecha) para el % de degradación de la carga orgánica en función de  $H_2O_2$  y pH

La Figura 5, de superficie de respuesta y contorno, muestra el efecto simultaneo del tiempo y  $H_2O_2$  para degradación de carga orgánica. Estas variables son contrarias, para una concentración baja de  $H_2O_2$  y tiempo

largo (28 minutos), la degradación de carga orgánica es superior a 96%. Y, para una concentración alta de  $H_2O_2$  y tiempo corto (12 minutos) la degradación de la carga orgánica está en el rango de 90 – 93 %.

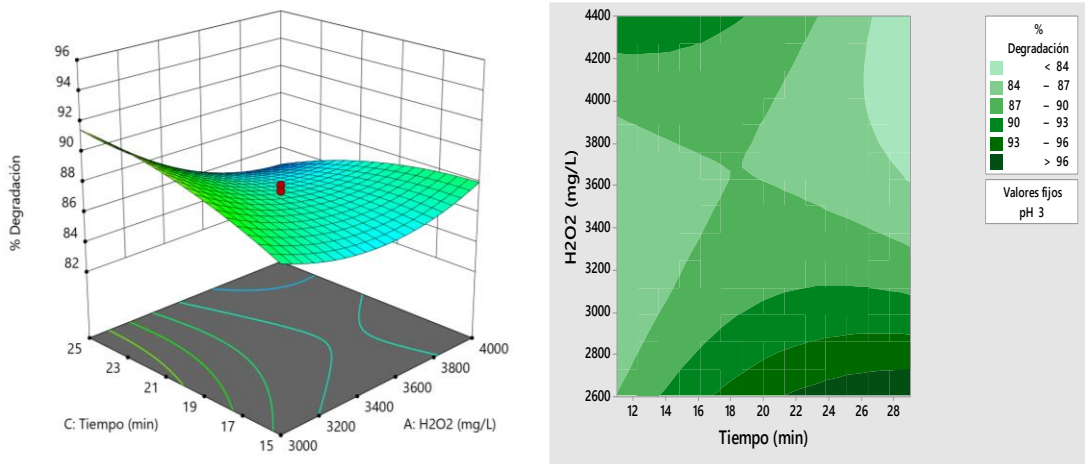


Figura 5. Superficie de respuesta (izquierda) y contorno de respuesta (derecha) para el % de degradación de carga orgánica función de  $H_2O_2$  y tiempo

Naumczyc *et al.* (2015) lograron degradar el 91% de la carga orgánica de lixiviado de relleno sanitario con proceso  $H_2O_2$ /UV, la dosis de peróxido fue de 500 mg/L y un periodo de exposición de 360 minutos, de acuerdo con los al resultado de superficie (Figura 05) este resultado concuerda, ya que cuando la concentración de peróxido disminuye y el tiempo de exposición

aumenta, el porcentaje de degradación es superior al 96%.

La Figura 06 muestra el efecto simultáneo del tiempo y pH para la degradación de carga orgánica. Las interacciones de estas variables presentan porcentaje de degradación superior al 90%.

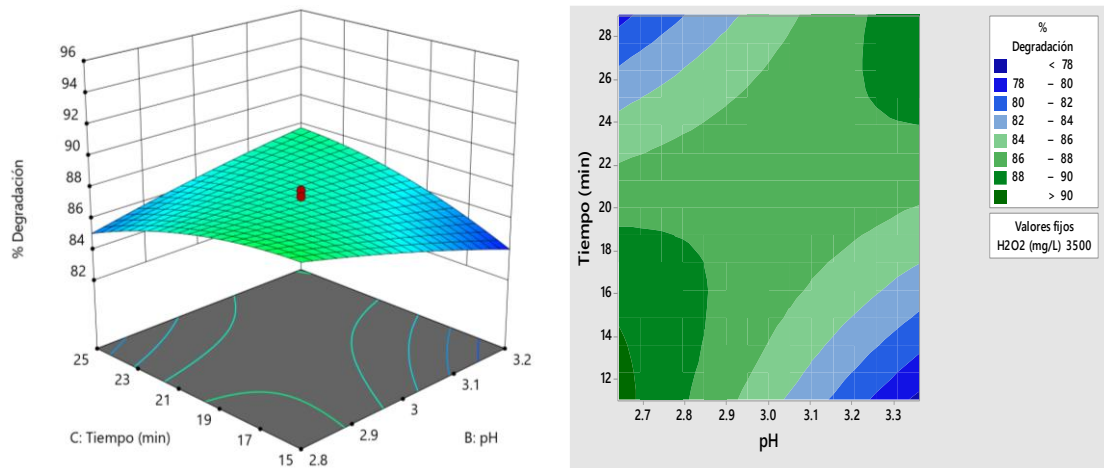


Figura 06. Superficie de respuesta (izquierda) y contorno de respuesta (derecha) para el porcentaje de degradación de la carga orgánica en función de tiempo y pH

**Dosis optima**

La Figura 07 muestra la optimización del modelo mediante la MSR. Los valores de las variables optimizadas son: concentración de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (2600 mg/L), pH (3.3) y tiempo (20 minutos), para un

porcentaje de degradación de 95.92%. Estos valores de las variables hacen máximo el rendimiento del proceso con la menor cantidad de reactivos y en un periodo corto.

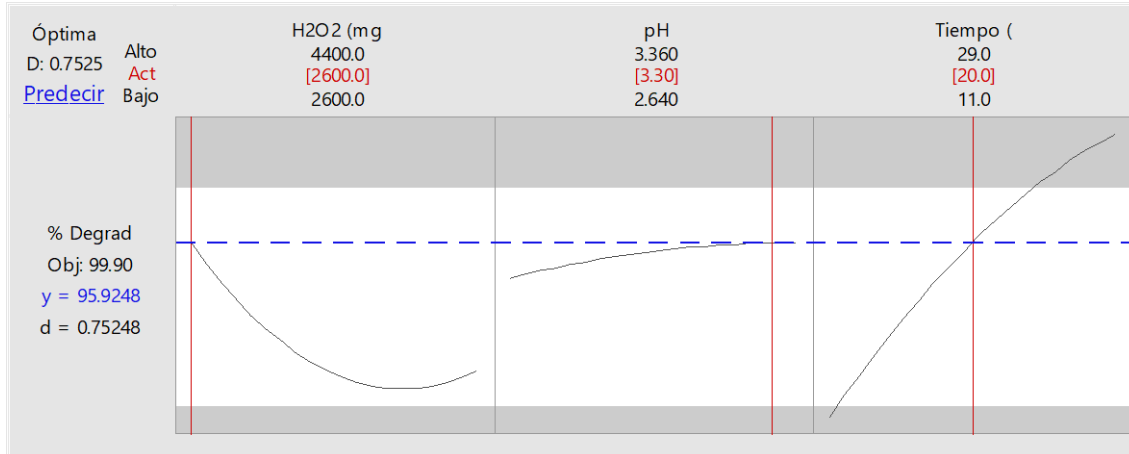


Figura 07. Optimización de proceso H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV/TiO<sub>2</sub> mediante MSR

El pH óptimo determinado por Medina *et al.* (2016) utilizando la metodología superficie de respuesta para el tratamiento de lixiviado es 3, mientras que en el presente trabajo el pH óptimo es 3.3.

De igual forma, el tiempo óptimo determinado por Medina *et al.* (2016) y Mayorca (2017) para tratamiento de lixiviado es 20 minutos, similar al tiempo óptimo determinado en el presente trabajo.

Arroyo (2016) logro degradar 6125 mg/L de carga orgánica de lixiviado de relleno

sanitario mediante proceso Fenton con concentración de  $\text{H}_2\text{O}_2$  de 1774.89 mg/L, esta concentración de peróxido es similar a la concentración optima determinado en la investigación.

### Simulación de la distribución de flujo y radiación incidente

La Figura 08 muestra las líneas de corriente y de la magnitud de la velocidad calculado

asumiendo un modelo laminar ( $\text{Re}=13$ ), a partir de las líneas de corriente se observa que el flujo es uniforme a través de la región anular. El ángulo de  $90^\circ$  de ingreso de flujo y número de Reynolds bajo favorece el flujo uniforme. Sin embargo, hay zona muerta cerca de la zona de salida.

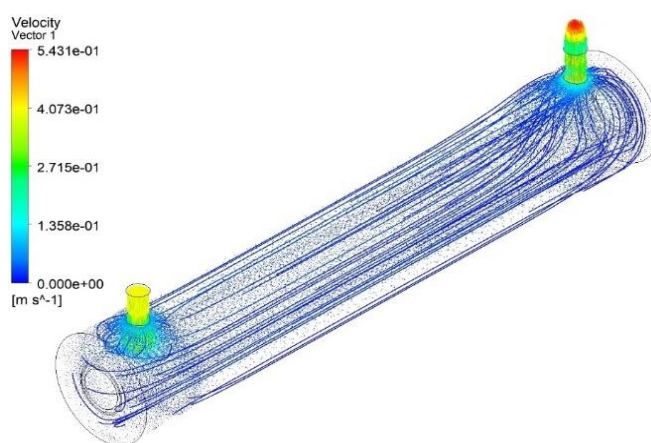


Figura 8. Líneas de corriente y magnitud de velocidad

Los estudios realizados de CFD por Casado (2017), Duran *et al.* (2015), Kumar y Bansal (2014) y Moreno *et al.* (2019) muestran la importancia de simular la distribución de flujo y del tiempo de residencia del mismo en reactores y que estos dependen de caudal y la forma de ingreso y salida del flujo. El ángulo de ingreso de flujo de  $45^\circ$  es recomendado para reactores con catalizador en suspensión. El reactor simulado en el presente estudio tiene un ángulo de ingreso de  $90^\circ$ , muestra que la distribución de flujo es homogénea en gran medida.

Según Kumar y Bansal (2014), el número de Reynolds es una variable que favorece el porcentaje de degradación de un compuesto en un reactor anular fotocatalítico, tal es así, que para  $\text{Re} 3$  el porcentaje de degradación es 50% y para  $\text{Re} 87$  es 90%. En la presente investigación, el número de Reynolds fue de 13, fue constante; por tanto, es probable que la eficiencia de degradación sea inferior al 90% o superior por el número de Reynolds bajo.

Mediante la simulación hidrodinámica se observó la existencia de zona muerta, según



Casado (2017), esta zona disminuye el rendimiento del proceso fotocatalítico, ya que no permite el en contacto con los catalizadores. Por tanto, estas zonas muertas afectaron el rendimiento del proceso para degradar la carga orgánica.

No obstante, es usual la presencia de zona muerta a la salida de reactor, como en la presente investigación. Incluso para flujos con elevado número de Reynolds, tal es el caso de Duran *et al.* (2015) que estudio en un rango de condición hidrodinámica ( $350 < RE$

$< 11\ 000$ ) advierte la presencia de zona muerta.

La Figura 09 muestra la distribución de la radiación incidente dentro del reactor. La radiación promedio es de  $150\text{W/m}^2$ , y los diámetros de las secciones son: 0 mm, 90 mm, 180 mm, 270 mm y 360 mm. Se considera las zonas de mayor incidencia como zonas de mayor actividad fotocatalítica para el peróxido de hidrogeno. La actividad fotocatalítica de  $\text{TiO}_2$  es afectado por la distancia, ya que está alejado de la fuente de radiación.

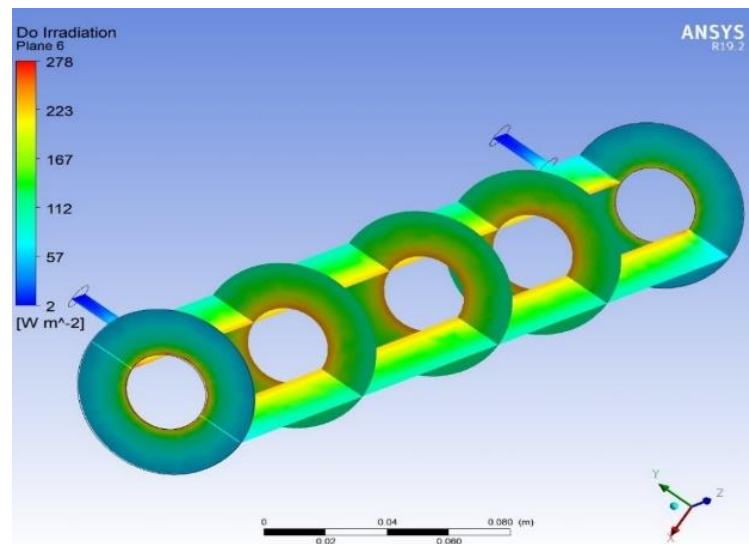


Figura 09. Distribución de radiación incidente en el reactor (b)

## DISCUSIÓN

En el interior del reactor se observa como en los extremos de la geometría la radiación es menor que en la parte central, debido al efecto de borde de la lámpara, que, al emitir de manera difusa, recibe menos radiación

en las celdas que forman el extremo del reactor.

Según Duran *et al.* (2015), Beley (2016) y Casado (2017) en reactores fotocatalítico el conocimiento del gradiente de radiación incidente que se produce en el interior del reactor es de suma importancia debido a su influencia en el rendimiento, es clave para

conocer las zonas con mayor velocidad de degradación del contaminante y posibilita mejoras de diseño. De acuerdo a ello, es probable que la eficiencia de degradación de la carga orgánica haya sido perjudicada ya que el  $TiO_2$  está alejado de la lámpara. Sin embargo, el peróxido de hidrógeno que está cerca a la lámpara es favorecido.

## CONCLUSIONES

De acuerdo a los parámetros pH, OD e índice de permanganato, el lixiviado presenta valores característicos de un lixiviado maduro.

El proceso de oxidación avanzada  $TiO_2/UV/H_2O_2$  es eficiente degradando el lixiviado de un relleno sanitario urbano. Y, el modelo de regresión determinado es estadísticamente significativo y se puede utilizar para explorar el espacio de diseño.

La simulación de distribución de flujo del reactor muestra que la distribución de flujo es homogénea, y muestra la existencia de zonas estancadas. Y, la simulación de la transferencia radiactiva permite conocer la distribución de la radiación y las posibles zonas de mayor actividad fotocatalítica.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APHA. (2017). Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. 23 ed. Editor American

Water Works Association (AWWA, WEF and APHA). Madrid, España. 1796 p.

Arroyo, M. (2016). Evaluación del proceso foto-Fenton en la disminución de la materia orgánica en el tratamiento de lixiviado en el botadero Agua de las Vírgenes, en el distrito de El Tambo, provincial de Huancayo, Región Junín. Tesis Ing. Ambiental. Universidad Alas Peruanas. Huancayo, Perú.

Astorga, C. (2018). Tratamiento de lixiviado de un relleno sanitario: propuesta y evaluación de un Sistema de humedales artificiales. Tesis Ingeniería Civil Química. Universidad de Chile. Santiago de Chile, Chile. 100 p.

Beley, N. (2016). Geometry of tube radiant heaters. Tesis Ingeniería Ambiental. Czech Technical University in Prague. Praga, Republica Checa. 53 p.

Box, G., Hunter, J., Hunter, W. (2008). Estadística para investigadores: diseño, innovación y descubrimiento. Versión española traducida por Dr. Xaviere Tomás Morre. 2 ed. Editorial Reverte. 645 p.

Cáceres, V. (2002). Evaluación analítica y optimización de procesos de oxidación

- avanzada en planta piloto solar. Tesis Doctoral. Almería, España. Universidad de Almería. 368 p.
- Casado, C. (2017). Aplicación de técnicas de fluido dinámica computacional al modelado y simulación de reactores foto catalíticos a partir de parámetros cinéticos intrínsecos. Tesis doctoral. Universidad Rey Juan Carlos. Madrid, España. 261 p.
- Duran, E., Mohseni, M., Taghipour, F. (2015). Computational fluid dynamics modeling of immobilized photocatalytic reactors for water treatment. *AIChE Journal*. Vancouver, Canada. 57 (7): 1860-1872.
- Hassan, M., Wang, X., Wang, F., Wu, D., Hussain, A., Xie, B. (2016). Coupling ARB-based biological and photochemical (UV/TiO<sub>2</sub> and UV/S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>) techniques to deal with sanitary landfill leachate. *Waste Management*.
- Kumar, J., Bansal, A. (2013). Photocatalytic degradation in annular reactor: Modelization and optimization using computational fluid dynamics (CDF).
- Kurniawan, T., Lo, W., Chan, G. (2006). Physico-chemical treatments for removal of recalcitrant contaminants from landfill leachate. *Journal of Hazardous Materials*, B129,80-100.
- D.L. N°1278. (2017). Ley de gestión integral de residuos sólidos
- Mayorca, N. (2017). Reducción de la carga orgánica en lixiviado estabilizado del botadero municipal de San Ramón mediante oxidación avanzada foto-Fenton. Tesis Ing. Ambiental. Universidad Nacional Agraria de la Selva. Tingo María. 129 p
- Medina, C., Montero, E., Cruz, L. (2016). Optimización del proceso Fenton en el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios. *Revista de la Sociedad Química del Perú*. 82(4): 454-466.
- MINAM. (2019). Rellenos sanitarios en operación. [En línea]: Minam, ([http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2019/03/listado-RELLENOS-SANITARIOS-EN-OPERACION\\_20-3-2019.pdf](http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2019/03/listado-RELLENOS-SANITARIOS-EN-OPERACION_20-3-2019.pdf), 12 de marzo, 2019).
- Montgomery, D. (2004). Diseño y análisis de experimentos. 2da Edit. México, D.F. México, Limusa Weley. 692 p.
- Moreno, J., Casado, C., Marugan, J. (2019). Improved Discrete Ordinate Method for accurate simulation radiation

transporte using solar and LED light sources. *Chemical Engineering Science*. 205:151-164.

Municipalidad Provincial de Concepción. (2015). Plan integral de gestión ambiental de residuos sólidos de la provincia de Concepción. 11 p.

Naumczyk, J., Prokurat, I., Marcinowski, P. (2012). Landfill leachates treatment by H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV, O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, modified fenton, and modified photo-Fenton methods. *International Journal of Photoenergy*. 2012: 1- 9.

OEFA. (2019). Botaderos informales a nivel nacional. [En línea]: Oefa, (<https://www.oefa.gob.pe/noticias-institucionales/oefa-identifica-1585-botaderos-informales-nivel-nacional>, 12 de marzo, 2019)

Rojas, C. (2008). Potabilización de aguas superficiales mediante el proceso de ultrafiltración con membranas arrolladas en espiral. Tesis doctoral. Universidad de Granada. Granada, España. 271 p.

Vilar, A. (2015). Evaluación del tratamiento integral del lixiviado de vertedero de residuos sólidos urbanos. Tesis doctoral. Coruña, España. Universidad de Coruña. 228 p.

## Contacto

José Luis Tito Huarcaya

Jtito7@hotmail.com