

Efecto de la presión de saturación en la operación en modo batch de un reactor DAF escala laboratorio para el tratamiento de efluentes municipales

Solmaría Mandi Pérez-Guzmán ¹, Eduardo Hernández-Aguilar ², Erik Samuel Rosas-Mendoza ¹, Alejandro Alvarado-Lassman ¹ y Juan Manuel Méndez-Contreras ^{1,*}

¹ División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Orizaba, Oriente 9 No. 852, col. Emiliano Zapata, C. P. 94320, Orizaba, Veracruz, México.

² Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Veracruzana, Campus Orizaba, Oriente 6 no. 1009, col. Rafael Alvarado, C. P. 94340, Orizaba, Veracruz, México.

* Autor de correspondencia: juan.mc@orizaba.tecnm.mx; Tel.: (+52) 272 111 5889.

Artículo de divulgación científica

Recibido: 27 de septiembre de 2024

Aceptado: 26 de octubre de 2024

Publicado: 2 de diciembre de 2024

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v3i1.218>

Resumen: Se realizó la caracterización fisicoquímica y tratamiento de un afluente del Río Blanco que recibe descargas de aguas domésticas. Este análisis demostró que el agua tiene un alto contenido de materia orgánica con 155.91 mg/L de DQO total, 27.59 mgP/L de fósforo, 1.647 mg/L de oxígeno disuelto con 22.353 % de saturación y turbidez de 113.33 NTU, valores que sobrepasan el máximo permitido por la NOM-001-SEMARNAT-2021. El tratamiento del agua se realizó empleando un sistema de flotación por aire disuelto (DAF) escala piloto, el cual se operó en modo batch durante 7 minutos utilizando $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ como coagulante, con un volumen de recirculación de 1 L/min y presiones de 40, 50 y 60 PSI. Los resultados obtenidos mostraron una reducción del 93.93 % en DQO total a 60 PSI, 99.75 % de DQO soluble a 50 PSI, 92.31 % de turbidez a 60 PSI y 77.2 % de color (436 nm a 60 PSI). Para el análisis de resultados se empleó ANOVA y prueba de Tukey con un nivel de significancia del 0.05, el cual demostró que no hay diferencias significativas entre las presiones utilizadas. Se concluyó que el DAF es adecuado para la remoción de contaminantes en el afluente analizado.

Palabras clave: Contaminantes orgánicos; Efluentes municipales; Flotación por aire disuelto; Presión de saturación.

Introducción

Actualmente, debido al aumento de la población mundial y las actividades antropogénicas se generan residuos que contaminan los mantos acuíferos. Uno de estos residuos son las aguas residuales municipales, mismas que se definen como aquellas generadas por domicilios o comercios, y son vertidas en la red de saneamiento municipal (SEMARNAT, 2018). Entre los contaminantes presentes en los efluentes urbanos se encuentran nitrógeno, fósforo, bacterias coliformes fecales, materia orgánica, entre otros (Mercado-Reyes *et al.* 2023). En 2012 el estado de Veracruz se posicionó como el tercero que más descargas de aguas municipales generó, con 16.08 m³/s, detrás del estado de México (24.22 m³/s) y la Ciudad de México (21.96 m³/s), que en conjunto suman el 27.1 % del total nacional (SEMARNAT, 2019). La contaminación de mantos acuíferos se traduce en enfermedades para la población, tales como diarrea, desnutrición, malaria, dengue, esquistosomiasis, solo por mencionar algunas (Jacobo-García, 2020).

Por lo anterior, es importante encontrar y proponer tratamientos que ayuden a la depuración de las aguas. Un método fisicoquímico primario adecuado para este fin es el de flotación por aire disuelto o DAF (Dissolved Air Flotation), cuyo funcionamiento se basa en la generación de microburbujas que se unen a los sólidos en suspensión del agua contaminada, formando flóculos fácilmente removibles (Sánchez *et al.* 2017). Algunos de los parámetros indispensables para el diseño del sistema de flotación son tamaño de flóculos, tiempo de retención en la cámara de saturación y presión de saturación, entre otros (Muñoz-Alegría *et al.* 2021). La presión de saturación es importante ya que forma una corriente hipersaturada que se mezcla con la muestra a tratar dentro del sistema formando un complejo gas-sólido que flota a la superficie y es fácilmente removible con una desnatadora (Fluence, 2024).

El objetivo de esta investigación es analizar fisicoquímicamente el agua del Río Blanco contaminada con efluentes municipales, así como evaluar la eficiencia de remoción de contaminantes orgánicos utilizando un reactor de flotación por aire disuelto con sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) como coagulante a tres distintas presiones de saturación, 40, 50 y 60 PSI, con un tiempo de operación de 7 minutos y 1 L/min de recirculación.

Desarrollo

Muestreo del agua contaminada

El agua contaminada se muestreó en un afluente del Río Blanco que recibe descargas domésticas no controladas, el cual corre en la zona norte del municipio de Camerino Z. Mendoza, en el estado de Veracruz. Se eligió ese afluente debido a que esa zona presenta descargas de aguas domésticas de las casas ubicadas en la zona circundante, así como municipales e industriales. Para fines de esta investigación se recolectó una muestra mediante muestreo puntual, representativo, a las 14 hrs, momento del día en que hay mayor caudal en el río, en el mes de abril que corresponde a la temporada de estiaje. La recolección de la muestra se realizó conforme el procedimiento indicado por la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Caracterización fisicoquímica y microbiológica del agua residual

La evaluación de diversos parámetros en el agua contaminada es útil para establecer valores iniciales de referencia de utilidad durante la fase de depuración de contaminantes orgánicos. Los análisis realizados en esta etapa, así como las normativas y métodos empleados se describen en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros a evaluar en el agua contaminada

Análisis físicos	Norma Mexicana
pH	NMX-AA-008-SCFI-2016
Temperatura	NMX-AA-007-SCFI-2013
Turbidez	NMX-AA-038-SCFI-2001
Sólidos Totales y Sólidos Volátiles	NMX-AA-034-SCFI-2015
O ₂ disuelto y saturación	NMX-AA-012-SCFI-2001
Color verdadero	NMX-AA-017-SCFI-2021
Análisis Químicos	Método
DQO total y soluble	NMX-AA-030/1-SCFI-2012
Fósforo	NMX-AA-029-SCFI-2001
Análisis Microbiológicos	Norma Mexicana
Huevos de helminto	NMX-AA-113-SCFI-2012

Condiciones de funcionamiento del sistema

El sistema DAF por el cual se realizó el tratamiento del agua residual estaba conformado por los siguientes componentes: compresor de aire marca Tatsa®, cámara de saturación de PET con capacidad de 20 L, columna de flotación de poliuretano de 2.4 L de capacidad unido a una llave de salida del agua tratada (Figura 1).

El DAF se operó durante 7 minutos, con volumen de reciclo de 1 L x min y tres presiones de trabajo, 40, 50 y 60 PSI. El tiempo de funcionamiento y volumen de recirculación se mantuvieron constantes y la presión del aire varió desde 40 hasta 60 PSI. Además se preparó una solución de concentración de 10 ppm de Al₂(SO₄)₃ como coagulante (Díaz *et al.*, 2017). El diseño experimental empleado fue unifactorial con tres niveles y tres

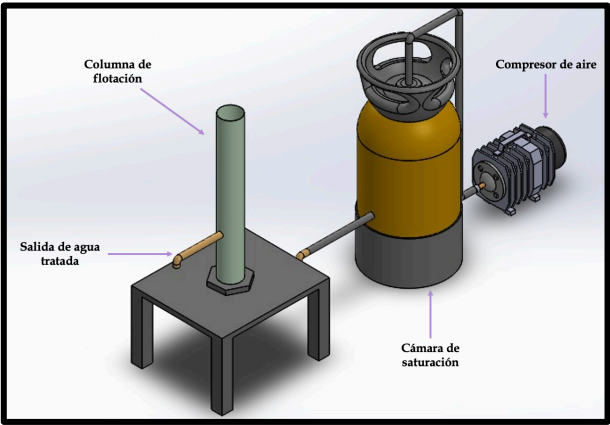


Figura 1. Esquema del sistema DAF

réplicas, tomando como factor la presión, además, se utilizó el método Tukey para comparaciones múltiples con un valor de significancia de 0.05.

Para evaluar el funcionamiento del sistema se analizaron DQO total y soluble, turbidez y color verdadero del agua antes y después de su paso a través del DAF.

Resultados

Características fisicoquímicas del efluente

En la Tabla 2 se observan los resultados obtenidos de la caracterización inicial de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos analizados en el agua de desecho, así como los límites máximos permisibles de contaminantes en aguas indicados por la NOM-001-SEMARNAT-2021. El pH es ligeramente ácido, con una temperatura cercana a la ambiental, encontrándose bajo el límite máximo indicado por la NOM-001 de 35 °C (SEMARNAT, 2021). La muestra tiene bajo contenido de DQO total y soluble, así como de sólidos totales, por lo que su remoción y tratamiento serán más sencillos. La turbidez indica la cantidad de partículas suspendidas en un fluido (Mullins *et al.*, 2018), las cuales se consideran como contaminantes en esta muestra por ser ajenas a la composición básica del agua. El oxígeno disuelto es indicador de la calidad del agua, entre mayor sea su porcentaje, los contaminantes se pueden degradar más rápidamente, purificando así de forma natural en menor tiempo el agua (Wei *et al.* 2019). Las especies marinas requieren al menos 5 mg/L de oxígeno con una saturación entre 80 a 120% para poder sobrevivir (Bozorg-Haddad *et al.* 2021). El resultado obtenido no cumple con ese mínimo indicado, lo que puede conllevar a la asfixia de la biota acuática. En cuanto a los parámetros microbiológicos, no se encontraron huevos de helmintos pero sí hay presencia de coliformes fecales, lo cual es indicativo de que la muestra presenta contaminación por materia fecal, por lo que es necesario aplicarle algún tipo de tratamiento antes de su descarga, ya que puede ser fuente de enfermedades en el sistema digestivo.

Tabla 2. Resultados de la evaluación inicial al agua contaminada

Parámetro	Resultado	Máximo permisible	Unidades
pH	8.19	6 - 9	
Temperatura	21	35	° C
DQO total	155.91	150	mg / L
DQO soluble	53.91		mg / L
Fósforo	27.59	15	mgP / L
Sólidos totales	0.212	-	% w/w
Sólidos totales volátiles	43.353	-	% w/w
Turbidez	113.33	-	NTU
Oxígeno disuelto	1.647	5	mg / L
Saturación	22.533	80	%
Color verdadero			
436 nm	10.53	7	m ⁻¹
525 nm	8.06	5	
620 nm	6.83	3	
Huevos de helminto	No encontrados	0	HH / 100 mL
Coliformes fecales	7 x 10 ³	1 – 2 x 10 ³	NMP / 100 mL

Tratamiento del agua contaminada con el sistema DAF

Los resultados del tratamiento primario a las aguas contaminadas se presentan en la Tabla 3. Estos se comparan con los valores del agua cruda sin tratar. Después del tratamiento en el DAF, en la DQO total los porcentajes de remoción fueron de 93.71, 93.82 y 93.93 % para las presiones de 40, 50 y 60 PSI respectivamente, mientras que en la DQO soluble los porcentajes de remoción fueron de 85.53, 99.75 y 98.51 % correspondientes a las mismas presiones previamente descritas.

Aunque las presiones de saturación de 40 y 50 PSI mostraron buenos resultados en cuanto a remoción de turbidez, el mejor se obtuvo a los 60 PSI, ya que se obtuvo la lectura más baja, con un porcentaje de eliminación del 92.31 %. Por otro lado, el parámetro de color de igual forma mostró mejores resultados en la mayor presión empleada en el DAF. Todos los resultados se compararon con los reportados por Díaz-Díaz *et al.*, (2018), que trató aguas contaminadas con aceites procedentes de una refinería con flotación por aire disuelto. Se puede notar que el sistema DAF tiene mayor capacidad de disminución en la DQO total, turbidez y color verdadero a comparación de las aguas oleosas, lo cual se puede atribuir a la naturaleza de las muestras.

Tabla 3. Parámetros evaluados en la muestra de agua después del DAF

Parámetro	Agua cruda	40 PSI	50 PSI	60 PSI	Referencia (Díaz-Díaz <i>et al.</i> , 2018)
DQO Total (mg/L)	155.91	9.8	9.63	9.46	170
DQO Soluble (mg/L)	53.91	7.8	0.13	0.8	
Turbidez (NTU)	113.33	36	35.7	8.71	21.9
Color verdadero (465 nm)					70
436 nm (m ⁻¹)	10.53	9.5	7.9	2.4	
525 nm (m ⁻¹)	8.06	5.2	4.7	3.9	
620 nm (m ⁻¹)	6.83	2.3	6.6	5	
pH	8.19	8	7.95	7.66	7.7

Los resultados anteriores se visualizan de forma gráfica en la Figura 2. La remoción de más del 85 % de la DQO concuerda con lo reportado por Pimiento *et al.*, (2020), quien obtuvo porcentajes del 87 % de DQO eliminada en el agua residual de una industria alimenticia empleando el sistema DAF. Todos los parámetros muestran tendencia a la disminución con el tratamiento en el sistema DAF, pero se obtuvieron mejores resultados empleando la presión mayor, de 60 PSI, sin embargo, esto puede significar un mayor consumo energético.

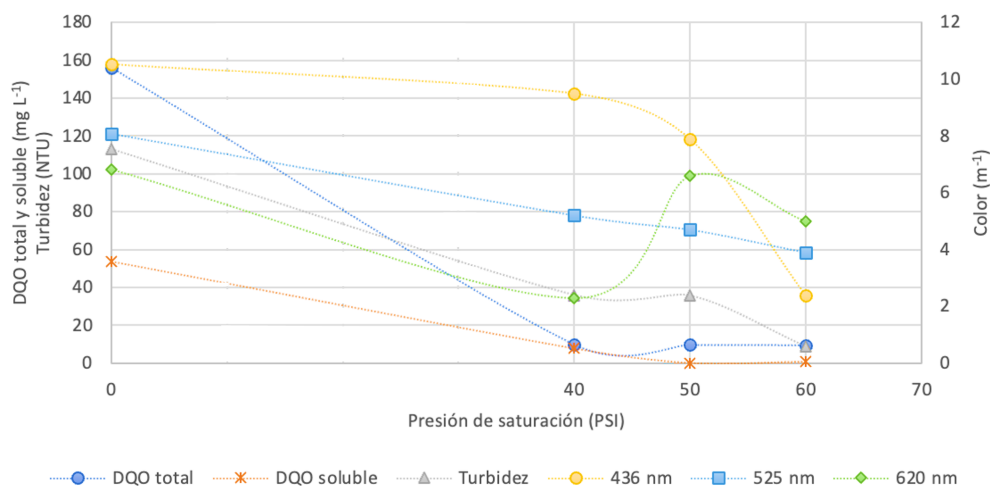


Figura 2. Remoción de contaminantes

De acuerdo al análisis de comparación de medias de Tukey, las tres diferentes presiones de saturación no tuvieron diferencias significativas entre ellas en la remoción de contaminantes del afluente del Río Blanco (DQO_t $p=0.317$ y DQO_s $p=0.087$), por ende, se debe seleccionar la que genere menores costos de operación. En la Figura 3 se puede observar gráficamente que es evidente la disminución en los parámetros de turbidez y color en las muestras después de haber sido tratadas con el DAF, lo cual indica que el sistema de flotación por aire disuelto es efectivo en la remoción de macropartículas contaminantes en las aguas residuales y/o contaminadas (Pooja *et al.*, 2021).

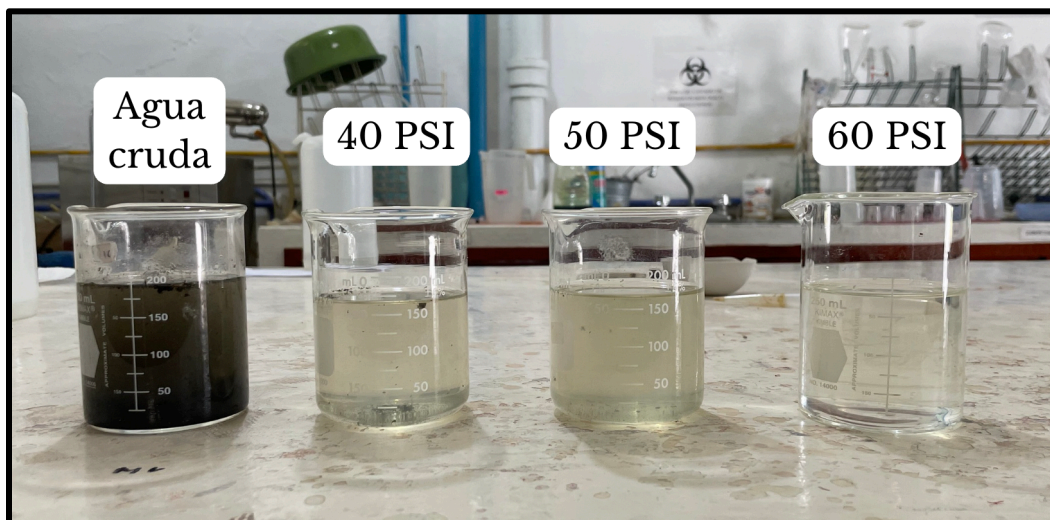


Figura 3. Muestras de agua después del DAF

Conclusiones

En la zona centro del estado de Veracruz se encuentra el Río Blanco, afluente contaminado que puede representar un riesgo para la salud a los habitantes cercanos al efluente, es por ello que se propuso un tratamiento primario con el sistema de flotación por aire disuelto, conocido como DAF, que se basa en la generación de microburbujas para formar coágulos de sólidos fácilmente removibles.

De acuerdo a los porcentajes obtenidos de remoción de ambas DQO, turbidez y color, mayores al 90 %, se demostró que el sistema DAF es eficiente para la remoción de contaminantes en efluentes municipales. La presión de saturación es relevante en el funcionamiento del DAF, sin embargo, si se utiliza la mínima presión necesaria para generar microburbujas se obtienen resultados óptimos en la eliminación de contaminantes, lo cual a su vez disminuye el consumo energético del sistema. El análisis de medias de Tukey empleado mostró que no hay diferencias significativas entre las presiones empleadas. Con lo anteriormente expuesto se concluye que la cuenca del Río Blanco se encuentra altamente contaminada, y el sistema de flotación por aire disuelto o DAF es una opción recomendable para usarse en el tratamiento de este afluente y dar solución al problema de contaminación actualmente existente.

Bibliografía

- Bozorg-Haddad, Delpasand O., M., H. Loáiciga. 2021. Water quality, hygiene and health. *Economical, Political and Social Issues in Water Resources*. Elsevier. Tehrán.
- Diario Oficial de la Federación. (2021). *Análisis de agua – Medición de color verdadero en aguas naturales, residuales, residuales tratadas y marinas – Mediante coeficientes de absorción espectral - Método de prueba*. Norma Oficial Mexicana NMX-AA-017-SCFI-2021. Diario Oficial de la Federación.
- Diario Oficial de la Federación. (2016). *Análisis de agua – Medición del pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba*. Norma Oficial Mexicana STANDARD NMX-AA-008-SCFI-2016. Diario Oficial de la Federación.
- Diario Oficial de la Federación. (2015). *Análisis de agua – Medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba*. Norma Oficial Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2015. Diario Oficial de la Federación.
- Diario Oficial de la Federación. (2015). *Análisis de agua – Enumeración de organismos coliformes totales, organismos coliformes fecales (termotolerantes) y Escherichia coli - Método del número más probable en tubos*. Norma Oficial Mexicana STANDARD NMX-AA-113-SCFI-2012. Diario Oficial de la Federación.
- Diario Oficial de la Federación. (2013). *Análisis de agua – Medición de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba*. Norma Oficial Mexicana NMX-AA-007-SCFI-2013. Diario Oficial de la Federación.
- Diario Oficial de la Federación. (2012). *Análisis de agua – Medición del número de huevos de helminto en aguas residuales y residuales tratadas por observación microscópica. Método de prueba*. Norma Oficial Mexicana STANDARD NMX-AA-113-SCFI-2012. Diario Oficial de la Federación.
- Diario Oficial de la Federación. (2001). *Análisis de aguas – Determinación de fósforo total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba*. Norma Oficial Mexicana STANDARD NMX-AA-029-SCFI-2001. Diario Oficial de la Federación.
- Diario Oficial de la Federación. (2001). *Análisis de agua – Determinación de turbiedad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba*. Norma Oficial Mexicana NMX-AA-038-SCFI-2001. Diario Oficial de la Federación.

- Diario Oficial de la Federación. (2001). *Análisis de agua – Determinación de oxígeno disuelto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba*. Norma Oficial Mexicana STANDARD NMX-AA-012-SCFI-2001. Diario Oficial de la Federación.
- Diario Oficial de la Federación. (2001). *Análisis de agua – Determinación de la Demanda Química de Oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba*. Norma Oficial Mexicana STANDARD NMX-AA-030-SCFI-2001. Diario Oficial de la Federación.
- Díaz, M., Rivas, L., Fernández, D., Salazar, D., Miller, S., la Maza, N. Selección de programa químico de tratamiento para aguas residuales oleosas. (2017). *Centro Azúcar*. 44(2): 89-100.
- Díaz-Díaz, M. A., Rivas-Trasancos, L., Fernández-Rangel, D., Salazar-Alemán, D., Miller-Palmer, S. (2018). Tratamiento de aguas residuales oleosas mediante flotación por aire disuelto. *Tecnología Química*, 38(2).
- Fluence. (2024). *Flotación de Aire Disuelto*. <https://www.fluencecorp.com/es/flotacion-aire-disuelto/>.
- Jacobo-García, F. R. (2020). Aguas residuales urbanas y sus efectos en la comunidad de Paso Blanco, municipio de Jesús María, Aguascalientes. *Revista Col. San Luis*, 8(16), <https://doi.org/10.21696/rcsl9162018760>.
- Mercado-Reyes, I., X. Álvarez-Montero. (2023). Biorrefinerías de microalgas: perspectivas en Ecuador. CYTED.
- Mullins, D., Coburn, D., Hannon, L., Jones, E., Clifford, E., Glavin, M. (2018). A novel image processing-based system for turbidity measurement in domestic and industrial wastewater. *Water Sci Technol*. 77(5-6): 1469-1482. <https://doi.org/10.2166/wst.2018.030>.
- Muñoz-Alegría, J. A., E. Muñoz-España, J. F. Flórez-Marulanda. (2021). Dissolved Air Flotation: A Review from the Perspective of System Parameters and Uses in Wastewater Treatment. *Tecnológicas*, 24(52), e2111, <https://doi.org/10.22430/22565337.2111>.
- Pimiento, K., Cárdenas-González, M. J. (2021). Evaluación del tratamiento preliminar y primario para las aguas residuales del procesamiento industrial de alimentos en La Grita (Venezuela). *INGE*. 17(1). <https://doi.org/10.17981/ingecuc.17.1.2021.01>.
- Pooja, G., Kumar, P. S., Prasannamedha, G., Varjani, S., Vo, D. N. (2021). Sustainable approach on removal of toxic metals from electroplating industrial wastewater using dissolved air flotation. *J Environ Eng*. 295, 113147. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113147>.
- Sánchez, M., Caldera, Y., Gutiérrez, E. (2017). Eficiencia de coagulantes durante el tratamiento de aguas residuales de la industria avícola en un sistema de flotación. *Impacto Científico*. 12(1), 201-214.
- SEMARNAT. (2019). *Estadísticas del agua en México. Edición 2019*. CONAGUA.
- SEMARNAT. (2018). Desarrollo de rutas de instrumentación de las contribuciones nacionalmente determinadas en materia de mitigación de gases y compuestos de efecto invernadero (GyCEI) del sector aguas residuales en México. INECC.
- SEMARNAT. 2021. NOM-001-SEMARNAT-2021. Límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. *Diario Oficial de la Federación*.
- Wei, Y., Y. Jiao, D. An, D. Li, W. Li, Q. Wei. 2019. Review of Dissolved Oxygen Detection Technology: From Laboratory Analysis to Online Intelligent Detection. *Sensors*. 19(18): 3995. <https://doi.org/10.3390/s19183995>.