

Artículo Original

Decaimiento de coliformes fecales en lagunas aireadas de plantas de tratamiento de aguas residuales en Lima metropolitana

Decay of fecal coliforms in aerated lagoons of wastewater treatment plants in metropolitan Lima

<https://doi.org/10.52808/bmsa.7e6.626.032>

Roberto Carlos Dávila-Morán ^{1,*}

<https://orcid.org/0000-0003-3181-8801>

Leopoldo Choque Flores ²

<https://orcid.org/0000-0003-0914-7159>

Justiniano Felix Palomino Quispe ²

<https://orcid.org/0000-0001-5220-0563>

Luis Villar Requis Carbajal ²

<https://orcid.org/0000-0002-3816-7047>

Luis Jimmy Clemente Condori ²

<https://orcid.org/0000-0002-0250-4363>

Domingo Zapana Diaz ²

<https://orcid.org/0000-0001-5447-3549>

Recibido: 21/06/2022

Aceptado: 28/10/2022

RESUMEN

A nivel mundial, el 44% de las aguas residuales domésticas no se tratan de forma segura, la recolección y tratamiento de aguas residuales, se ha convertido en un desafío, particularmente en áreas urbanas de bajos ingresos dentro de los países en desarrollo, donde las aguas residuales pueden fluir sin tratar a transportes de aguas pluviales o canales de drenaje informales. No es raro encontrar efluentes, desechos sólidos, excretas humanas y descargas líquidas de industrias y hospitales en las aguas superficiales de muchas zonas urbanas de los países en desarrollo. El proceso de tratamiento de aguas residuales puede ser llevado en lagunas mediante reacciones tanto oxidativas como reductoras. En la capa superior de la laguna, donde las aguas residuales son aeróbicas, ocurre el mecanismo convencional de la demanda bioquímica de oxígeno aeróbico (DBO) y se produce la oxidación del amoníaco. La capa inferior de la laguna es anaerobia, y en esta zona tiene lugar la digestión de los sólidos del lodo, un intermedio, la zona facultativa permite la respiración con aceptores de electrones terminales distintos del oxígeno, esto permite reacciones como la desnitrificación. Los gases producidos en las zonas inferiores se estabilizan en la zona aeróbica por disolución oxígeno, y esto reduce los problemas de olores. Este estudio tiene como objetivo, estudiar el descenso de coliformes fecales en lagunas aireadas de plantas de tratamiento de aguas residuales en la ciudad de Lima, Perú. Los resultados señalan que la separación diferencial de las aguas tratadas, experimentó un descenso del 13 al 26% de coliformes fecales en todas las lagunas de tratamiento.

Palabras clave: Coliformes fecales, lagunas de oxidación, tratamiento de agua, *Escherichia coli*.

ABSTRACT

Globally, 44% of domestic wastewater is not treated safely, and wastewater collection and treatment has become a challenge, particularly in low-income urban areas within developing countries, where wastewater may flow untreated into stormwater conveyances or informal drainage channels. It is not uncommon to find effluents, solid wastes, human excreta, and liquid discharges from industries and hospitals in the surface waters of many urban areas in developing countries. The wastewater treatment process can be carried out in lagoons through both oxidative and reductive reactions. In the upper layer of the lagoon, where the wastewater is aerobic, the conventional mechanism of aerobic biochemical oxygen demand (BOD) occurs and ammonia oxidation occurs. The lower layer of the lagoon is anaerobic, and in this zone the digestion of the sludge solids takes place, an intermediate, the facultative zone allows respiration with terminal electron acceptors other than oxygen, and this allows reactions such as denitrification. The gases produced in the lower zones are stabilized in the aerobic zone by dissolving oxygen, and this reduces odor problems. The objective of this study is to study the decrease of fecal coliforms in aerated lagoons of wastewater treatment plants in the city of Lima, Peru. The results indicate that the differential separation of the treated waters experienced a decrease from 13 to 26% of fecal coliforms in all treatment lagoons.

Keywords: Fecal coliforms, oxidation ponds, water treatment, *Escherichia coli*.

¹ Universidad Privada del Norte (UPN), Lima, Perú.

² Universidad César Vallejo (UCV), Lima, Perú.

*Autor de Correspondencia: rdavila430@gmail.com

Introducción

A nivel mundial, el 44% de las aguas residuales domésticas no se tratan de forma segura (ONU-Agua, 2021) la recolección y tratamiento de aguas residuales se ha convertido en un desafío, particularmente en áreas urbanas de bajos ingresos dentro de los países en desarrollo, donde las aguas residuales pueden fluir sin tratar a transportes de aguas



pluviales o canales de drenaje informales. No es raro observar efluentes, desechos sólidos, excretas humanas y descargas líquidas de industrias y hospitales en las aguas superficiales de muchas zonas urbanas de los países en desarrollo. Además, más personas viven en áreas urbanas que en áreas rurales del mundo (ONU, 2018) y a nivel medio se proyecta que el urbanismo en América Latina y el Caribe alcance pronto el 83% (ONU, 2018; Garcia *et al.*, 2022).

El proceso de trata de aguas residuales filtradas puede ocurrir en lagunas mediante reacciones tanto oxidativas como reductoras. En la capa superior de la laguna, donde las aguas residuales son aeróbicas, ocurre el mecanismo convencional de la demanda bioquímica de oxígeno aeróbico (DBO) y se produce la oxidación del amoníaco. La capa inferior de la laguna es anaerobia y en esta zona tiene lugar la digestión de los sólidos del lodo, un intermedio. La zona facultativa permite la respiración con aceptores de electrones terminales distintos del oxígeno y esto permite reacciones como la desnitrificación. Los gases producidos en las zonas inferiores se estabilizan la zona aeróbica por disolución del oxígeno y esto reduce los problemas de olores (Fciwem *et al.*, 2006).

Por otra parte, los coliformes totales son un grupo de bacterias que están muy extendidas en la naturaleza. Todos los miembros del grupo de coliformes totales pueden estar presentes en las heces humanas, pero algunos de ellos también están presentes en el estiércol animal, el suelo y la madera sumergida y en otros lugares fuera del cuerpo humano (EPA, 2012). Los tipos de coliformes totales incluyen *Citrobacter*, *Kiebsiella*, *Citrobacter* y coliformes fecales como *E. Coli*. El coliforme fecal se encuentra comúnmente en el procesamiento de aguas residuales, y su eliminación es muy importante. Los coliformes fecales proporcionan un riesgo debido a las múltiples enfermedades que se propagan a través de ellas. Cuando hay una gran cantidad de coliformes fecales, también existe la posibilidad de la presencia de bacterias patógenas. Esto da razón para eliminar la materia fecal en todas las aplicaciones de agua. Las lagunas y estanques de aguas residuales generalmente controlan las heces por fotooxidación a través de la luz solar y la aireación. Los contaminantes fecales ingresan a las instalaciones de aguas residuales a través de los desechos domésticos, pero los propietarios de estanques también pueden encontrarse con un aumento de coliformes, proveniente de los desechos de los animales de granja que se liberan y se convierten en vapores por la escorrentía de la lluvia o el riego. Los desechos de las áreas urbanas pueden ingresar a los arroyos y lagos durante las tormentas o un alto flujo de agua y también a través de un mal alcantarillado, tanques sépticos e incluso plantas de aguas residuales mal administradas (Louwanda, 2014). En el proceso de purificación y después de descartar los objetos más grandes que entran a la laguna, se procede a airear las aguas residuales para ayudar en la descomposición del material de desecho, y la separación del agua del material pesado. El agua clarificada se envía para desinfección, por cloro o luz ultravioleta. Algunas plantas irán un paso más allá y agregarán la filtración antes de la desinfección. El cloro y la luz ultravioleta están destinados a matar la mayor cantidad posible de bacterias que quedan en el agua clarificada. Es decir, llegar a los límites permitidos de las bacterias coliformes fecales a un nivel aceptable. Eso ayuda a asegurar que haya una menor posibilidad de descargar de organismos peligrosos asociados con coliformes fecales en el agua del estado. Como se mencionó anteriormente, el uso de cloro o luz ultravioleta es lo que mata las bacterias coliformes fecales en aguas residuales, pero sin la aireación de las aguas residuales en las primeras partes del tratamiento o proceso, el cloro y los rayos UV serían ineficaces. La razón de esto es porque durante aireación, los organismos que viven en la cuenca de aireación pueden descomponer material más grande durante el mezclado: cuanto más se descompongan estos sólidos, mejor se pueden asentar en el fondo del clarificador en la siguiente cámara y no flotar a la superficie. Si el material sólido más grande pasa a través la cámara de aireación y el clarificador, entonces las bacterias coliformes fecales se pueden “esconder” en esos sólidos, donde el cloro y las luces ultravioleta no pueden desinfectar tan eficientemente, permitiendo que las bacterias abandonen la planta de tratamiento (Martínez *et al.*, 2012; Whitt, 2021).

Este estudio tiene como objetivo, estudiar el descenso de coliformes fecales en lagunas aireadas de plantas de tratamiento de aguas residuales en Lima metropolitana.

Materiales y métodos

La investigación evaluativa se llevó a cabo mediante un enfoque cuantitativo con diseño de campo no experimental, tomando como unidad de estudio tres plantas de tratamiento de agua aireadas, ejecutada durante el segundo semestre 2021; se contó con la autorización de la Gerencia de Gestión de Aguas Residuales del Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima (SEDAPAL). Para lograr los objetivos se establecieron tres fases que se describen a continuación.

Fase 1: Descripción y diagnóstico de la planta de tratamiento de agua residual del proceso productivo, además se estimó, de las bases de datos de SEDAPAL, el caudal a través del método volumétrico, medido en litros por segundo.

Fase 2: En esta etapa se hizo uso de las mismas técnicas de recolección de datos de la primera fase para conocer los parámetros de concentración de Sólidos Suspendidos Totales (SST mg/L), Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV mg/L), Demanda Bioquímica de Oxígeno Total 5 y 20 (DBO_{5, 20}T mg/L), Demanda Bioquímica de Oxígeno Soluble 5 y 20 (DBO_{5, 20}S mg/L), % DBO_{5, 20}, Demanda Química de Oxígeno Total (DQO T mg/L), Demanda Química de Oxígeno Soluble (DQO S mg/L), % DQO S, Nitrógeno Total (NT mg/L), N-NH₃ mg/L, N-NO₂ mg/L, N-NH₃ mg/L, % Remoción (NTK % R) y % Remoción NH₃. En la determinación de los análisis realizados se utilizaron los métodos descritos en el Standard Methods for Examination Water and Wastewater (APHA-AWWA-WEF, 1995).

Fase 3: Estimación del coeficiente de velocidad de remoción de coliformes fecales. El coeficiente de reducción bacteriana “Kb” varía de microorganismo a microorganismo, este valor de Kb es un coeficiente muy dependiente de la temperatura de la zona donde se ubiquen las plantas. El descenso de organismos coliformes en un cuerpo de agua puede ser representado por una tasa de decaimiento (Kb) que está compuesta por tres elementos: el de crecimiento asociado a la mortalidad natural y a la salinidad (Kb₁), el decaimiento asociado al efecto de la luz y las radiaciones solares (Kb_i) y la tasa asociada al detrimento de coliformes debidos a sedimentación (Kb_s). La tasa total de decaimiento puede ser representada por medio de la fórmula (Chapra, 1997):

$$Kb = Kb_1 + Kb_i + Kb_s$$

Donde:

Kb = Tasa total de crecimiento

Kb₁ = Tasa de mortalidad y salinidad

Kb_i = Tasa de decaimiento por radiación solar

Kb_s = Tasa de decaimiento por sedimentación

Por último, es importante mostrar que a partir del *cad* se puede establecer tanto la fracción de bacterias unidas en el sedimento como la fracción libre de ellas en el agua esto se demuestra con las dos ecuaciones siguientes de Chapra:

$$F_w = \frac{1}{1 + kd * m}$$

$$F_p = \frac{kd * m}{1 + kd * m}$$

Por analogía, se puede presentar la ecuación *kd* que también puede ser entendida como la relación existente entre la concentración de bacterias coliformes atrapadas en los sedimentos y la concentración de dichas bacterias que quedan libres en el agua utilizando la expresión siguiente:

$$Kd = \frac{\text{concentración de bacterias atrapadas por unidad de masa de sedimento} \left(\frac{\text{numero}}{100 \text{ mL}} \right) / g}{\text{concentración de bacterias libres por un concentración de bacterias atrapadas por volumen líquido} \left(\frac{\text{numero}}{100 \text{ mL}} \right) / \text{mL}}$$

Resultados

El sistema de lagunas aireadas es un tipo de tratamiento para líquidos residuales que se adapta fácilmente a regiones de climas cálidos, en este estudio se muestrearon 3 plantas (Tabla1) con un caudal de 1639 litros por segundo, con caudales de 637.549 y 453L/s para las plantas: A, B y C respectivamente. Se utilizó un sistema de lagunas aireadas de mezcla completa, llamadas también lagunas aireadas de biomasa en suspensión, en el cual, la presencia de algas no es aparente, esta es una alternativa de tratamiento frente a los problemas de malos olores, baja eficiencia y la necesidad de grandes extensiones de terreno. Esto puede considerarse como un proceso incipiente de lodos activados, sin separación y recirculación de lodos. La densidad de la biomasa es considerablemente menor que en los procesos de lodos activados y para el dimensionamiento de las lagunas se relaciona el período de retención con la tasa de generación de sólidos activos, de modo que no se produzca un lavado de biomasa del sistema.

Tabla 1. Generación de agua residual en Lima metropolitana, según forma de tratamiento, 2021

Agua residual	Unidad de medida	2021
Total de aguas servidas tratadas		
Caudal	l/s	20 879
Caudal	Miles m ³ /día	1 508
Volumen generado	Miles m ³ /año	550 420
Tratamiento (Preliminar avanzado)		
Caudal	l/s	17 046
Número de plantas		2
Tratamiento (Sistemas convencionales - Lagunas de oxidación)		
Caudal	l/s	70
Número de plantas		3
Tratamiento (Lagunas aireadas)		
Caudal	l/s	1 639
Número de plantas		3
Tratamiento (Lagunas lodos activados)		
Caudal	l/s	1 245
Número de plantas		10
Tratamiento (Sistemas anaerobios - aerobios)		
Caudal	l/s	872
Número de plantas		5
Tratamiento (Filtro percolador)		
Caudal	l/s	8
Número de plantas		1

Fuente: Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima (SEDAPAL) - Gerencia de Gestión de Aguas Residuales, (2021).

La tabla 2, representa los valores de entrada de todos los parámetros fisicoquímicos totales, y para cada una de las lagunas aeróbicas de tratamiento. Tal como se puede observar, cada una de las lagunas presentó parámetros físicos químicos únicos, variando de una laguna a otra. Esto se debe a las características particulares de las aguas residuales tratadas por cada una de estas lagunas.

Tabla 2. Parametros físico-químicos

Medición	Entrada	Laguna		
		A	B	c
PH	8.56	8,26	7,35	7,06
Conductividad (Ms)	1069	1045	703,3	766,3
Turbiedad (NTU)	275,4	250	95,4	153
Temperatura	11,4	11,5	12,8	13
SST (mg/L)	121	124	132	184
SSV (mg/L)	89	90	88	114
SSV/SSS (%)	74	73	67	62
DBO _{5, 20} Total (mg/L)	143	20	29	26
DBO _{5, 20} Soluble (mg/L)		6	11	9
(%R) DBO _{5, 20} Soluble		96	92	94
DQO Total (xng/L)	214	188	214	230
DQO Soluble (mg/L..)	135	74	135	113
(%R) DQO Soluble		39	66	71
Nitrogeno Total (mg/L)	32.28	31.72	32.28	32.56
NTK (mg/L)	37	6.3	7.4	7.4
N-NH ₃ (mg/L)	2,8	1.04	2.8	1.50
N-NO ₂ (mg/L)	0,04	0,24	L.38	0.46
N-NO ₃ (mg/L)	0.27	25.2	23,5	24,7
NTK (%R)		73	79	79
NH ₃ (%R)		91	93	95

La Tabla 3, representa algunos de los parámetros físico-químicos y biológicos, tales como cantidad de coleiformes totales y E. coli determinados en cada una de las lagunas de acuerdo con la hora de tratamiento durante las 8:00am y 6:00pm. En el caso del pH, éste se mantuvo relativamente constante (pH=7,40) independiente de la hora del día o de la laguna de tratamiento. Así mismo, el pH fue incrementando a medida que la hora de la toma fue incrementando. En cuanto a la conductividad, la misma va aumentando a medida que avanza las horas del día, hasta alcanzar un máximo alrededor de las 12pm (~430ms/cm) y después comienza a descender, siendo el valor más bajo alrededor de las 6:00pm (~410ms/cm). Un comportamiento similar fue observado con la cantidad de O₂ disuelto, que alcanzó un máximo alrededor de las 12pm. De manera similar, la temperatura del agua y del ambiente fue aumentando, siendo los mayores valores encontrados alrededor de las 3:00pm. En todo caso, la temperatura ambiente fue al menos dos grados centígrados menor en el agua que en el ambiente. En cuanto a los parámetros biológicos, E. coli y coleiformes totales, a primera hora de la mañana 8:00am, los valores de E. coli y coleiformes totales, siempre estuvieron en cantidades apreciables, alrededor de 100.000 y 500.000 en todas las lagunas de tratamiento, y fueron descendiendo apreciablemente a medida que transcurría el tiempo alrededor de las 3:00pm alcanzando valores de 64.000 para E. coli alrededor de las 3:00pm. En el caso de los coleiformes fecales, el número de coleiformes descendió alrededor de las 10:00am en todas las lagunas de tratamiento.

Tabla 3. Valoración del agua residual en lagunas aireadas según la hora

Laguna	Hora	E. coli	Coliformes totales	Temperatura °C		Conductibilidad mS/cm	pH	O ₂ Disuelto mg/L
				Agua	Ambiente			
A	8:00 a. m.	100.000,00	490.000,00	17,40	21,10	335,00	7,10	1,50
	10:00 a. m.	50.000,00	350.000,00	18,70	22,70	447,00	7,18	1,65
	12:00 m	70.000,00	400.000,00	19,40	24,40	445,00	7,25	1,80
	3:00 p. m.	64.000,00	510.000,00	19,80	25,30	404,00	7,40	1,75
	6:00 p. m.	90.000,00	600.000,00	17,30	22,60	410,00	7,45	1,60
B	8:00 a. m.	100.000,00	520.000,00	17,20	21,10	330,00	7,30	1,78
	10:00 a. m.	100.000,00	470.000,00	18,30	22,70	420,00	7,40	1,83
	12:00 m	90.000,00	400.000,00	19,30	24,40	430,00	7,70	1,80
	3:00 p. m.	70.000,00	510.000,00	19,80	25,30	395,00	7,90	1,75
	6:00 p. m.	90.000,00	550.000,00	17,10	22,60	415,00	7,90	1,65
C	8:00 a. m.	87.000,00	450.000,00	16,60	21,10	397,00	7,00	1,23
	10:00 a. m.	50.000,00	350.000,00	17,30	22,70	410,00	7,20	1,65
	12:00 m	63.000,00	400.000,00	19,20	24,40	455,00	7,25	1,50
	3:00 p. m.	70.000,00	500.000,00	19,80	25,30	404,00	7,50	1,60
	6:00 p. m.	80.000,00	610.000,00	17,00	22,60	410,00	7,60	1,83

Por otra parte, la cantidad de unidades formadoras de colonias, siempre fue mayor en el sedimento que el sobrenadante. La separación diferencial de las aguas tratadas, experimento un descenso del 13 al 26% en todas las

lagunas de tratamiento. El menor valor observado, fue de un 13% en la laguna B, y el mayor valor en la laguna C con un 23% de descenso.

Tabla 4. Decaimiento de la carga bacteriana en el agua residual por separación diferencial *

Laguna	Original (Promedio)	Agua (UFC/100ml)			% Diferencial
		Sobrenadante	Sedimento	Total	
A	470.000	131.600	239.700	371.300	21,00
B	490.000	156.800	269.500	426.300	13,00
C	462.000	97.020	258.720	355.740	23,00

* 3000 rpm

Discusión

El agua es un recurso importante y un componente de todos los seres vivos. Sin embargo, la población humana está siempre en constante crecimiento y está planteando importantes desafíos en las diferentes fuentes de agua al contribuir significativamente a la contaminación a través de la liberación de aguas residuales de los hogares y plantas industriales. La determinación de las políticas de gestión y reutilización de aguas residuales, incluido el recurso hídrico integrado (IWRM), por parte de científicos y diferentes partes interesadas tanto en el sector público como en el privado, encuentran extremadamente importante mitigar la contaminación de los varios recursos hídricos y al mismo tiempo aliviar los problemas de escasez de agua tanto en el sector agrícola como en el industrial (Rodríguez *et al.*, 2020). En 1973, la Organización Mundial de la Salud (OMS) emitió por primera vez una guía sobre cómo tratar las aguas residuales para su reutilización con salvaguardas sanitarias. Después, se siguieron otras pautas (OMS, 1973) como la reutilización del agua por parte de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA) en 1992 (US EPA/USAID, 1992) y para aguas residuales tratadas para proyectos de riego por la Organización Internacional de Normalización (ISO) en 2015 (ISO, 2015). Durante las últimas tres décadas, ha habido un cambio en el concepto de recuperación y reutilización de aguas residuales; en particular, se ha incluido en los planes de GIRH para suministrar recursos hídricos confiables y aliviar la escasez de agua en diversos entornos (Angelakis *et al.*, 2018). De hecho, en 2017 la Organización Mundial de las Naciones Unidas Water Development Report recomendó que las grandes cantidades de aguas residuales liberadas en el medio ambiente pudieran considerarse un recurso valioso en lugar de un problema costoso (UNESCO, 2017). Además, los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) descritos por las Naciones Unidas (ONU) proporcionaron una nueva dimensión a los desafíos y oportunidades en el agua sector de abastecimiento y saneamiento, cambiando el paradigma hacia una economía circular en la que se pueda recuperar agua limpia, energía, nutrientes y biosólidos de las aguas residuales (ONU, 2015). En la actualidad, iniciativas exitosas en materia de reutilización de aguas residuales para el riego agrícola y paisajístico y los usos directos e indirectos de agua potable se han expandido en muchos países, como el Estados Unidos, Japón, Australia, Israel, Chipre, España, Singapur, India y Sudáfrica (Australian Water Recycling Centre of Excellence & Kellis *et al.*, 2013; Khan 2013; Onyango *et al.*, 2014; Banco Mundial, 2018; 2020). La producción mundial de aguas residuales domésticas e industriales para el año 2015 fue de aproximadamente 359,4. 109m³ año⁻¹, y sobre El 80% de las aguas residuales del mundo se vertieron en el medio ambiente sin tratamiento. En este año de referencia, las tasas más altas de recolección y tratamiento de aguas residuales se registraron en Europa occidental (86–88%) y las más bajas en el sur de Asia (16–31%) y el África subsahariana (16–23%) (UNESCO, 2017; Jones *et al.*, 2021; Kanchanapiya & Tantisattayakul, 2022).

Por otro lado, es común el uso de lagunas de oxidación el tratamiento de aguas residuales. Las lagunas de oxidación son estructuras artificiales, construidas generalmente de tierra, donde se llevan a cabo una serie de procesos, tales como: sedimentación, digestión y conversión de desechos orgánicos por bacterias y algas. En su clasificación anaeróbica, tienen un componente alto de materia orgánica y su función es la de permitir la sedimentación de sólidos y la remoción de esa materia orgánica en ausencia de oxígeno. En las facultativas, el proceso de degradación ocurre en tres fases. En el fondo de la laguna existen condiciones anaeróbicas que generan biogás y que produce un ligero mezclado. En la fase intermedia, llevada a cabo por los microorganismos facultativos encargados de la degradación de la materia orgánica. La parte superior, de unos 20 a 30cm de la superficie, se llevan a cabo en fase aeróbica, con la producción de oxígeno por medio de algas que utilizan como fuente de energía la luz solar en el estanque, en esta zona se llevan a cabo la remoción de microorganismos patógenos, ya que la remoción de materia orgánica es baja. En el caso de las lagunas aireadas, se utiliza una fuente extra de oxígeno de manera mecánica (Matsumoto & Sánchez Ortiz, 2010).

En este trabajo se detallan los resultados de tres lagunas aireadas ubicadas en la perimetral de la ciudad de Lima, Perú, con el fin de remover la mayor cantidad de coleiformes fecales. Los resultados de caracterización de las lagunas se pueden observar en la tabla 3, allí se representan algunos parámetros físico-químicos y biológicos de acuerdo con la hora de tratamiento durante las 8:00am y 6:00pm. En el caso del pH, éste se mantuvo relativamente constante (pH=7,40) independiente de la hora del día o de la laguna de tratamiento. Así mismo, el se incrementó a medida que la hora de la toma fue también incrementando. En el caso de la cantidad de O₂ disuelto, ésta alcanzó un valor máximo alrededor de las 12pm, y después empezó a descender a medida que aumentaba la hora de la toma de muestra. En cuanto a los parámetros biológicos, E. coli y coleiformes totales, a primeras horas de la mañana, 8:00am, los valores de E. coli y coleiformes totales, siempre estuvieron en cantidades apreciables, alrededor de 100.000 y 500.000 en todas las

lagunas de tratamiento, y fueron descendiendo apreciablemente a medida que transcurría el tiempo alrededor de las 3:00pm alcanzando valores de 64.000 para E. coli alrededor de las 3:00pm. En el caso de los coleiformes fecales, el número de coleiformes descendió alrededor de las 10:00am en todas las lagunas de tratamiento. Por otra parte, la cantidad de unidades formadoras de colonias, siempre fue mayor en el sedimento que el sobrenadante. La separación diferencial de las aguas tratadas, experimentó un descenso del 13 al 26% en todas las lagunas de tratamiento. El menor valor observado, fue de un 13% en la laguna B, y el mayor valor en la laguna C con un 23% de descenso. Investigaciones publicadas limitadas y conclusiones resultantes sobre la eliminación más eficiente.

Un estudio publicado Tyagi *et al.*, (2011) en India, encontraron que en sistemas Proceso de Lodos Activados (ASP), y el Proceso de Aire Extendido (EA) es capaz de eliminar el 99% de coleiformes fecales en el sistema EA lo hizo ligeramente mejor (99,9%) en comparación el sistema ASP (99,4%). Algo a tener en cuenta a la hora de este estudio, son las estaciones climáticas en India ya que climas más cálidos facilita mejores resultados del tratamiento. Otro estudio llevado a cabo por Fu *et al.*, (2010) usaron lagunas del tipo ASP estándar, logrando tasas de remoción de coliformes fecales en 99%. Un estudio realizado en Francia y Bélgica que se centró en doce plantas de tratamiento de aguas residuales de diferentes procesos para probar la remoción de coliformes fecales se encontró que el éxito de la misma dependía del tiempo de retención (George *et al.*, 2002). Se probaron diferentes tipos de tratamiento, desde el proceso normal de lodos activados, hasta el proceso de lodos activados con nitrificación y desnitrificación, hasta tratamiento en laguna. Si bien todos los procesos removieron los coliformes fecales en un cierto porcentaje, fue la laguna con lodos activados con desnitrificación que tuvo la mejor remoción debido a la cantidad de retención tiempo en cada proceso. En el caso de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Tijuana, México se logró conseguir bajo un sistema de tratamiento aeróbico una eliminación de >85% de la demanda química de oxígeno y carbono orgánico disuelto con una reducción de ~2 log en coliformes totales y *Escherichia coli*, y una disminución de <20% en amoníaco del afluente final. Tras la incorporación de una laguna de maduración en 2020, el efluente llegó a los estándares de México para la reutilización en riego, con una reducción logarítmica de ~4 en coliformes fecales desde el influente hasta el final del efluente (García *et al.*, 2022).

Finalmente, si bien los resultados obtenidos en el descenso de coleiformes fecales, es importante realizar algunas mejoras, como, por ejemplo, disminuir los caudales adicionados a las lagunas de aireación a fin de aumentar la tasa de remoción de estos organismos patógenos. Estos tendrían como consecuencia la creación de nuevas lagunas de aireación.

Conflicto de intereses

No se reporta conflicto de intereses.

Agradecimientos

A todas las personas y amigos que nos alentaron con su apoyo moral a seguir adelante para poder servir mejor a nuestra comunidad, región y país, y que cada día estemos más preparados para enfrentar los retos que este mundo globalizado exige.

Referencias

- Angelakis, A. N., Asano, T., Bahri, A., Jimenez, B. E. & Tchobanoglous, G. (2018). Water reuse: from ancient to modern times and the future. *Frontiers in Environmental Science* 6, 1–17. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00026>
- APHA-AWWA-WEF. (1995). Standard Method for the Examination of Water Wastewater. 18TH Edition, American Public Health Assoc. Washington, DC. Disponible en: http://tandarmethods.org/doi/book/10.2105/SMWW.2882?gclid=CjwKCAiAhqCdBhB0EiwAH8M_GgaOC7iX7Wb5elulm23i-tHjiM0v9mRqZp0eh8PDTpmefqqWrZnEIIRoCdfwQAvD_BwE (Acceso abril 2022)
- Aquafix,(2014). Lowering Levels of Total Coliform in Wastewater Lagoons and Decorative Ponds. Disponible en: <https://teamaquafix.com/lowering-levels-of-total-coliform-in-wastewater-lagoons-and-decorative-ponds/>. (Acceso diciembre 2012)
- Australian Water Recycling Centre of Excellence Recycled water for drinking: A new source of pure water for San Diego, California. Disponible en: https://legacy.water360.com.au/wp-content/uploads/2015/07/J003887-San-Diego-fact-sheet_2.pdf (Acceso abril 2022).
- Chapra, S. C. (1997). Surface Water-Quality Modelin. McGraw-Hill. Disponible en: [https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=lbgSAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR3&dq=Chapra,+SC+\(1997\).+Surface+Water+Quality+Modeling.+McGraw-Hill.&ots=L_sWdWDif7&sig=26AHATeumyOO2Tx4Dbn7QufWUub8#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=lbgSAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR3&dq=Chapra,+SC+(1997).+Surface+Water+Quality+Modeling.+McGraw-Hill.&ots=L_sWdWDif7&sig=26AHATeumyOO2Tx4Dbn7QufWUub8#v=onepage&q&f=false) (Acceso abril 2022).

- EPA. (2012). What are fecal bacteria and why are they important. Disponible en: <http://water.epa.gov>. (Acceso abril 2022).
- Fciwem, N., Salih, A. & Walkinshaw, T. (2006). Wind-aerated lagoons for sustainable treatment of wastewaters from small communities. *Water and Environment Journal*, 20, 265–270. <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2005.00024.x>
- Fu, C. Y., Xie, X., Huang, J. J., Zhang, T., Wu, Q. Y., Chen, J. N., & Hu, H. Y. (2010). Monitoring and evaluation of removal of pathogens at municipal wastewater treatment plants. *Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research*, 61(6), 1589–1599. <https://doi.org/10.2166/wst.2010.757>
- García, D., Muñoz Meléndez, G., Arteaga, A., Ojeda-Revah, L., & Mladenov, N. (2022). Greening Urban Areas with Decentralized Wastewater Treatment and Reuse: A Case Study of Ecoparque in Tijuana, Mexico. *Water*, 14, 596. <https://doi.org/10.3390/w14040596>
- George, I., Crop, P., & Servais, P. (2002). Fecal coliform removal in wastewater treatment plants studied by plate counts and enzymatic methods. *Water research*, 36(10), 2607–2617. [https://doi.org/10.1016/s0043-1354\(01\)00475-4](https://doi.org/10.1016/s0043-1354(01)00475-4)
- ISO 15169 ISO 16075-1 (2015) Guidelines for Treated Wastewater use for Irrigation Projects–Part 1: The Basis of a Reuse Project for Irrigation. Disponible en: <https://www.iso.org/standard/62756.html> (Acceso abril 2022).
- Jones, E. R., van Vliet, M. T. H., Qadir, M., & Bierkens, M. F. P. (2021) Country-level and gridded estimates of wastewater production, collection, treatment and reuse. *Earth System Science Data*, 13(2), 237–254. Disponible en: <https://essd.copernicus.org/articles/13/237/2021/> (Acceso abril 2022).
- Kanchanapiya, P., & Tantisattayakul, T. (2022). Wastewater reclamation trends in Thailand. *Water Science & Technology*, 86(11), 2878. <https://doi.org/10.2166/wst.2022.375>
- Kellis, M., Kalavrouziotis, I. K., & Gikas, P. (2013) Review of wastewater reuse in the Mediterranean countries, focusing on regulations and policies for municipal and industrial applications. *Global Nest Journal*, 15(3), 333–350. Disponible en: https://journal.gnest.org/sites/default/files/Journal%20Papers/333-350_15-3_936_Kalavrouziotis.pdf (Acceso abril 2022).
- Khan, S. (2013) *Drinking Water Through Recycling: The Benefits and Costs of Supplying Direct to the Distribution System*. Australian Academy of Technological Sciences and Engineering, Australia. Disponible en: <https://www.atse.org.au/wp-content/uploads/2019/04/drinking-water-through-recycling-full-report.pdf> (Acceso abril 2022).
- Louwanda, J. (2014). What is Fecal Coliform? Why is it Important?. Clemson University. Disponible en: <http://www.clemson.edu> (Acceso abril 2022).
- Martínez, F., Salazar, A., Luévanos Rojas, A., Luévanos Rojas, R., & Uranga Sifuentes, A. C. (2012). Elimination of fecal coliforms in stabilization lagoons with different arrangements. *Far East Journal of Applied Mathematics*, 69(2), 87-110. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Arnulfo-Luevanos-Rojas/publication/267431564_Elimination_of_fecal_coliforms_in_stabilization_lagoons_with_different_arrangements/links/5a762f0e45851541ce5888f4/Elimination-of-fecal-coliforms-in-stabilization-lagoons-with-different-arrangements.pdf (Acceso abril 2022)
- Matsumoto, T., & Sánchez Ortiz, IA. (2010). Eficiencia del tratamiento de aguas residuales por lagunas facultativas e implicaciones en la salud pública. *Revista Centro de Estudios en Salud*, 1(12), 65–78. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0124-71072010000100009 (Acceso abril 2022).
- ONU. (2015) *General Assembly: Transforming our World: the 2030 Agenda for Sustainable Development (A/RES/70/1)*. United Nations, New York. Disponible en: <https://sdgs.un.org/2030agenda> (Acceso abril 2022).
- ONU. (2018). *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision*. 2018. Disponible en: <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-KeyFacts.pdf> (Acceso mayo 2022).
- ONU-Agua. (2021). *Quality and Wastewater*. UN-Water. Disponible en: <https://www.unwater.org/water-facts/quality-andwastewater/> (Acceso junio 2022).
- Onyango, L., Leslie, G. L., & Wood, J. G. 2014 *Global Potable Reuse Case Study 3: NEWater*, Singapore. Australian Water Recycling Centre of Excellence, University of New South Wales, Australia. Available from: Disponible en: <http://vuir.vu.edu.au/32233/> (Acceso abril 2022).
- Rodríguez, D. J., Serrano, H. A., Delgado, A., Nolasco, D., & Saltiel, G. (2020) *From Waste to Resource Recovery: Shifting Paradigms for Smarter Wastewater Interventions in Latin America and the Caribbean*. The World Bank, Washington, DC. Disponible en: <https://documents1.worldbank.org/curated/fr/151321564553997465/pdf/From->

[Waste-to-Resource-Shifting-paradigms-for-smarter-wastewater-interventions-in-Latin-America-and-the-Caribbean.pdf](#) (Acceso abril 2022).

- Tyagi, V. K., Sahoo, B. K., Khursheed, A., Kazmi, A. A., Ahmad, Z., & Chopra, A. K. (2011). Fate of coliforms and pathogenic parasite in four full-scale sewage treatment systems in india. Environmental Monitoring and Assessment, 181(1-4), 123-35. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1818-4>
- U.S. EPA/USAID. (1992). Guidelines for Water Reuse. U. S. Environmental Protection Agency, Washington, DC. Disponible en: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-08/documents/2004-guidelines-water-reuse.pdf> (Acceso abril 2022).
- UNESCO. (2017). UN World Water Development Report, Wastewater: The Untapped Resource. Paris: Water Assessment Programme (WWAP). Disponible en: <https://www.unwater.org/publications/world-water-development-report-2017/> (Acceso abril 2022).
- Whitt, C. E. (2021). Wastewater Treatment Plant's Effectiveness at Treating Fecal Coliforms on the Lower Kanawha River. Master degree. Marshall University. Disponible en: <https://mds.marshall.edu/etd> (Acceso abril 2022).
- WHO. (1973). Reuse of Effluents: Methods of Wastewater Treatment and Health Safeguards. World Health Organization, Geneva. Disponible en: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/41032> (Acceso abril 2022).
- World Bank. (2018) Wastewater: From Waste to Resource, The Case of Durban, South Africa. Waster Global Practice, 1-6. Disponible en: <https://www.worldbank.org/en/topic/water/publication/wastewater-initiative> (Acceso abril 2022).