



Aporte ambiental de la planta de tratamiento de aguas residuales Los Tajos en la remoción de contaminantes fisicoquímicos y microbiológicos

Environmental contribution of Los Tajos wastewater treatment plant in the removal of physicochemical and microbiological pollutants

Contribuição ambiental da estação de tratamento de esgoto Los Tajos na remoção de contaminantes físico-químicos e microbiológicos

Carmen Mora-Aparicio^{1*}, Carolina Alfaro-Chinchilla², Junior Pastor Pérez-Molina³, Ilena Vega-Guzmán⁴

Received: Jul/9/2021 • Accepted: Oct/20/2021 • Published: Jun/01/2022

Resumen

El objetivo del estudio fue analizar el aporte ambiental hacia la calidad del río Torres considerando la remoción de contaminantes fisicoquímicos y microbiológicos de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) Los Tajos. Se realizó el análisis de datos fisicoquímicos y microbiológicos de las aguas de afluente y efluente de la PTAR (DBO, DQO, SST, STT, N-NH_4^+ , P-PO_4^{3-} , GyA, SAAM y coliformes fecales principalmente) y se analizó la variación en concentración de contaminantes en el río Torres previo y posterior a la construcción de la PTAR, que realiza un tratamiento primario a las aguas, todo asociado a la estacionalidad. Los datos se analizaron en R versión 3.6.1. Según la metodología del índice holandés, el río Torres se clasificó severamente contaminado previo a la construcción de la PTAR, y actualmente aumenta su grado de contaminación después de la descarga de la PTAR, principalmente en época lluviosa. La PTAR presenta remoción significativa para siete de los ocho parámetros analizados, los porcentajes de remoción más representativos son: SST (68.5 %), DBO (49.8 %) y GyA (54.7 %). Se demostró el aporte cuantitativo de la PTAR al río Torres removiendo toneladas de contaminantes de las aguas residuales desde el 2015 hasta el 2020, principalmente DQO (26,791.8 Mg), SST (24,162.6 Mg), DBO (12,290.0 Mg) y STT (30,267.7 Mg). Finalmente se dejó en evidencia la necesidad de construir las siguientes etapas de la PTAR que incluyen tratamiento secundario, que mejoraría la remoción de materia orgánica, surfactantes y nutrientes.

Palabras clave: Carga contaminante; depuración; vertido; saneamiento.

Carmen Mora-Aparicio, ✉ camora@aya.go.cr,  <https://orcid.org/0000-0002-4405-9480>

Carolina Alfaro-Chinchilla, ✉ carolina.alfaro.chinchilla@una.cr,  <https://orcid.org/0000-0002-3965-0540>

Junior Pastor Pérez-Molina, ✉ junior.perez.molina@una.cr,  <https://orcid.org/0000-0002-3396-0599>

Ilena Vega-Guzmán, ivega@aya.go.cr,  <https://orcid.org/0000-0002-0690-3388>

* Autora para correspondencia.

1 Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, PTAR Los Tajos, San José, Costa Rica.

2 Laboratorio de Gestión de Desechos, Escuela de Química, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.

3 Laboratorio de Ecología Funcional y Ecosistemas Tropicales, Escuela de Ciencias Biológicas, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica

4 Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, Laboratorio Nacional de Aguas, Aguas Residuales, La Unión, Costa Rica



Abstract

The objective of the study was to analyze the environmental contribution, in terms of removal of physicochemical and microbiological pollutants, from the Los Tajos Wastewater Treatment Plant (WWTP) to the Torres River. Physicochemical and microbiological data was analyzed including WWTP inflows and outflows (OBD, OCD, TSS, STT, N-NH_4^+ , P-PO_4^{3-} , Oils, MBAS, and fecal coliforms). The difference in the concentration of pollutants in the Torres River before and after the construction of the WWTP was analyzed using R 3.6.1, associated with seasonality. According to the Dutch Index Methodology, the Torres River was severely polluted before the construction of the WWTP, and the degree of contamination increases following the WWTP discharge, mainly during the rainy season. The WWTP shows significant removal of seven of the eight parameters analyzed, with the most representative removal percentages being: TSS (68.5%), OBD (49.8%), and Oils (54.7%). The quantitative contribution of the WWTP to the Torres River was demonstrated by removing thousands of Mg of pollutants from wastewater during the years of operation (2015-2020), mainly OCD (26,791.8 Mg), STT (24,162.6 Mg), OBD (12,290.0 Mg), and TSS (30,267.7 Mg). Finally, building the WWTP's next stages, including secondary treatment, is needed to improve the removal of organic matter, surfactants, and nutrients.

Keywords: Pollutant load; depuration; wastewater effluent; sanitation.

Resumo

O estudo teve como objetivo analisar a contribuição ambiental na qualidade do rio Torres considerando a remoção de contaminantes físico-químicos e microbiológicos da Estação de Tratamento de Águas Residuais (ETAR) *Los Tajos*. Foi realizada a análise de dados físico-químicos e microbiológicos das águas de afluente e efluente da ETE (DBO, DQO, SST, STT, N-NH_4^+ , P-PO_4^{3-} , Óleo e Gordura, SAAM e coliformes fecais, principalmente), e analisada a variação em concentração de contaminantes no rio Torres prévia e posteriormente à construção da ETAR, que realiza um tratamento primário nas águas, tudo associado à estacionalidade. Os dados foram analisados em R versão 3.6.1. De acordo com a metodologia do índice holandês, o rio Torres foi classificado como severamente contaminado prévio à construção da ETAR e, atualmente, aumenta seu grau de contaminação depois da descarga da ETAR, principalmente nas épocas chuvosas. A ETAR apresenta remoção significativa de sete dos oito parâmetros analisados, as porcentagens de remoção mais representativas são: SST (68,5 %), DBO (49,8 %) e Óleo e Gordura (54,7 %). Ficou comprovada a contribuição quantitativa da ETAR para o rio Torres, removendo toneladas de contaminantes das águas residuais de 2015 a 2020, principalmente DQO (26,791.8 Mg), SST (24,162.6 Mg), DBO (12,290.0 Mg) e STT (30,267.7 Mg). Finalmente, ficou clara a necessidade de construir as próximas etapas da ETAR que incluem o tratamento secundário, que melhoraria a remoção de matéria orgânica, surfactantes e nutrientes.

Palavras-chave: Carga contaminante; depuração; descarga; saneamento.

Introducción

El aumento exponencial de la población y las consecuentes demandas energéticas, agrícolas, tecnológicas, entre otras,

han ejercido mayor presión en el recurso hídrico (Martinez & Villalejo, 2018). El uso de este recurso aumenta un 1 % cada año, y se estima que se mantenga este ritmo hasta el 2050, aumentando hasta un 30 %



de consumo respecto al nivel actual (ONU-Agua, 2019). Según la FAO (2012), dentro de los distintos usos del agua se destaca el agrícola, municipal e industrial, con un promedio de consumo de 70 %, 11 % y 19 % respectivamente. La agricultura incluye el riego, ganado, acuicultura, entre otras actividades. Mientras que la municipal corresponde, entre otros, al uso doméstico. Entre los usos del agua en la industria se destaca la creación de embalses, sistemas de calentamiento, lavado de productos, entre otros (FAO, 2012). En contraste con el patrón mencionado, es importante destacar que el agua es un recurso finito y vulnerable, que debe ser gestionado de forma planificada y responsable (Martínez & Villalejo, 2018).

Costa Rica es un país reconocido por su riqueza hídrica, con una disponibilidad per cápita anual que ronda los 31,300 metros cúbicos por persona (Vargas & Marín, 2016), siendo el Valle Central la zona con mayor riqueza, mientras que las regiones Huetar Norte y Pacífico Sur las que sufren ciertas limitaciones de disponibilidad del recurso (Valverde, 2013). Ballester (2013) indica que se vive una crisis hídrica en el país debido a las políticas insuficientes de gestión. Echeverría y Cantillo (2013) señalan la presencia de algunos factores que complican la gestión del recurso en el país, por ejemplo la baja eficiencia de aprovechamiento y distribución, llegando a cuantificar pérdidas de agua de hasta un 50% en la distribución. Por otro lado, indican que tanto los recursos superficiales, como los sub-superficiales, sufren contaminación puntual y difusa. En ambos casos, la consecuencia es una reducción de la disponibilidad per cápita total (Echeverría & Cantillo, 2013), siendo la contaminación de las quebradas y ríos urbanos uno de los problemas más frecuentes para el recurso hídrico (Vargas &

Marín, 2016). Sumado a lo anterior, se debe considerar el aporte del cambio climático que incide en los cambios en los patrones de precipitaciones, las temperaturas y periodos secos más extensos, (Valverde, 2013).

Las aguas residuales son aquellas que se descartan después de su uso y han sido modificadas en su calidad debido a la incorporación de sustancias diversas. Normalmente llegan a los ríos y a los mares alterando las características naturales de dichos cuerpos receptores (Rodríguez *et al.*, 2006). Dentro de estas, se conocen como aguas ordinarias o domésticas, aquellas utilizadas con fines higiénicos que provienen de las casas y se clasifican de acuerdo con la actividad que las genera en aguas negras (materia fecal) y aguas grises (baños, cocinas, lavanderías, entre otros) (Acosta, 2008). Además, existen las aguas especiales que corresponden a líquidos generados en los procesos industriales o comerciales; sus características contaminantes son específicas según el tipo de industria (Rodríguez *et al.*, 2006; Ramalho, 1996).

Dentro de las características de las aguas residuales se destacan el posible mal olor producto de la descomposición anaeróbica de la materia orgánica, la toxicidad debida a la presencia de productos químicos, su capacidad infecciosa por la presencia de microorganismos patógenos y finalmente la mala estética, esta última consecuencia de todas las alteraciones mencionadas (Rojas, 2002). Las aguas residuales deben recibir un tratamiento previo a su disposición final. Dicha acción controla los niveles de contaminación o toxicidad para reducir el impacto en el cuerpo receptor y cumplir con la legislación (Reynolds, 2002). En la elección de un método o sistema apto, se valoran las características fisicoquímicas de las aguas, el pretratamiento requerido para la corriente



y finalmente la viabilidad económica y técnica (Reynolds, 2002)

Costa Rica sufrió por varios años las consecuencias de un rezago en temas de infraestructura y tecnologías en el tratamiento de aguas residuales y en el control del cumplimiento de la legislación vigente para reducir la contaminación de los cuerpos de agua (Herrera, *et al.*, 2013). A pesar del aumento histórico en la cobertura de saneamiento, este sigue siendo limitado. En el 2015 la población que contaba con un alcantarillado sanitario seguido de planta de tratamiento era de un 4.2 % (Angulo, 2015), en el 2019 esta cobertura subió a un 22.9 %. Es importante mencionar que aún se mantiene el uso de tanques sépticos con un porcentaje del 75 % de la población y el 1.4 % usan letrinas (Mora & Portugal, 2019). Las instituciones encargadas de la gestión de estas aguas son el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AYA), la Empresa de Servicios Públicos de Heredia (ESPH) y algunas municipalidades (ARESEP, 2017).

En Costa Rica, con la intención de prevenir la contaminación del recurso hídrico, el AYA elaboró un proyecto denominado Saneamiento Ambiental del Área Metropolitana de San José. Este proyecto consiste en la construcción de colectores y redes de alcantarillado que trasladarán las aguas residuales del GAM directo a la PTAR Los Tajos, para que reciban un tratamiento antes de ser descartadas a río (Mora & Portugal, 2019). La población beneficiada es la que habita en los cantones de San José, Desamparados, Escazú, Goicoechea, Alajuelita, Vásquez de Coronado, Tibás, Moravia, Montes de Oca, Curridabat y la Unión (Presidencia de la República, 2016).

La PTAR Los Tajos inició sus operaciones en el 2015, y actualmente se encuentra

en funcionamiento la primera etapa que consiste en un tratamiento primario de las aguas residuales que incluye el tratamiento físico de las aguas (cribado, desarenado, desengrasado y sedimentación), tratamiento de los lodos generados (digestión y deshidratación), tratamiento del biogás producido (remoción de siloxanos, compuestos orgánicos volátiles y sulfuro de hidrógeno) y depuración de los olores resultantes del proceso (remoción de amoníaco y sulfuro de hidrógeno) y vertido en el río Torres. Se tiene proyectada la construcción de una etapa intermedia y secundaria que incluiría tratamiento secundario, sin embargo, es un proyecto a mediano-largo plazo del que al momento no se conoce una fecha cierta de inicio.

Es importante destacar que Herrera, Rodríguez, Rojas, Herrera, & Chaves (2013) analizaron la condición ambiental de la subcuenca del río Virilla, incluyendo al río Torres (2006 y 2010), estableciendo que este se considera un cuerpo de agua severamente contaminado y consideraron como posibles razones el aporte de minerales según el tipo de suelo y descargas de aguas residuales crudas (Herrera, Rodríguez, Rojas, Herrera, & Chaves, 2013).

Con el fin de establecer el aporte del tratamiento primario realizado por la PTAR al río Torres, se analizaron los resultados de todos los muestreos de este río realizados por el Laboratorio Nacional de Aguas del AyA antes de la puesta en marcha de la PTAR y posterior a esta, utilizando la Metodología del Sistema Holandés (MIH), utilizada en el país según se establece en el artículo 4 del Decreto 33903 (MINAE-MS, 2007). Además, se analizó la remoción de contaminantes de las aguas residuales que ingresan a la PTAR, con el fin de identificar diferencias en las cargas de contaminantes y la remoción de la misma según la época del año.



Metodología

La investigación se realizó en la planta de tratamiento de aguas residuales Los Tajos del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, ubicada en San José, La Uruca (Figura 1). Las coordenadas geográficas son 9°57'38''N y 84°08'13''O. La misma se encuentra cercana al río Torres, lugar donde actualmente vierte el agua que ha recibido tratamiento.

Se recopiló la información histórica de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del río Torres, antes y después de la construcción de la PTAR, todos los muestreos se realizaron en tres puntos específicos: (1) aguas arriba de la PTAR, (2) aguas abajo de la descarga de la PTAR y (3) Bajo Los Ledezma (punto de referencia para los muestreos previos a la construcción, se encuentra a cuatro km aguas arriba de la PTAR). Además, se recopiló la información histórica de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de las aguas residuales de entrada (afluente) y

salida (efluente) de la PTAR. Con la información mencionada se analizó cualitativa y cuantitativamente la situación ambiental del río Torres previo y posterior a la construcción de la PTAR, tomando en cuenta la variación estacional (seca, lluviosa). En este punto se determinó si existe una diferencia significativa en las concentraciones de contaminantes por estación en el río antes y después de la construcción de la PTAR.

Por otro lado, se determinó la eficiencia de remoción promedio de contaminantes y la carga vertida en las aguas residuales por la PTAR Los Tajos. Se consideraron los siguientes parámetros desde los datos operativos históricos de la PTAR: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendedos Totales (SST), Sólidos Totales (STT), pH, Temperatura, Conductividad, Sustancias activas al azul de metileno (SAAM), Grasas y Aceites (GyA), Nitrógeno amoniacal (N-NH₄⁺), Fósforo total (P-PO₄³⁻) y coliformes fecales, así mismo los caudales de operación.

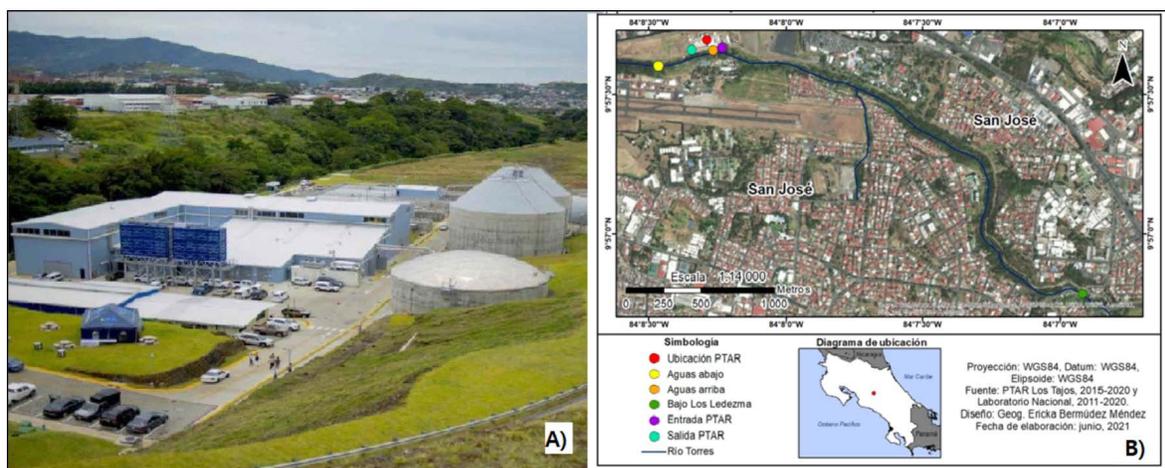


Figura 1. **A)** Fotografía de la PTAR Los Tajos. Fuente: Elmundo.cr (2021), disponible en: <https://www.elmundo.cr/costa-rica/planta-de-tratamiento-los-tajos-generara-beneficios-adicionales-al-saneamiento-en-primera-etapa-de-funcionamiento/>. **B)** Ubicación de la PTAR Los Tajos y los puntos de muestreo del presente estudio.

Nota: Fuente propia de la investigación.



Con los datos mencionados se analizó la variación en la remoción de los contaminantes de acuerdo con la estacionalidad.

Finalmente, se analizaron las posibles relaciones entre la remoción de la PTAR y la carga vertida, con las características analizadas del río Torres con el fin de evaluar los aportes ambientales de la PTAR Los Tajos.

Los datos utilizados en esta investigación se recopilaban de los resultados generados por programa de Monitoreo de la Cuenca 24 y del programa de control y vigilancia de la PTAR Los Tajos que realiza el Laboratorio Nacional de Aguas (LNA) y de los resultados del control operativo del Laboratorio de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Los Tajos, ambos del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados. Dichos datos se detallan en la Tabla 1.

A partir de la información anterior, se realizó la comparación de medias mensuales de las concentraciones de los parámetros y la remoción de la PTAR a lo largo

del tiempo considerando el efecto de la estacionalidad (seca y lluviosa), a través de análisis de varianza (ANDEVA). El mismo enfoque se empleó en los datos del río Torres, con la comparación de niveles de variación después de la descarga de aguas residuales. Se evaluó la calidad del río en términos de contaminación, utilizando la Metodología del Índice Holandés, la cual contempla los parámetros más relevantes que indican la contaminación orgánica como la DBO, $N-NH_4^+$ y el porcentaje de saturación de oxígeno. Según la concentración de los parámetros mencionados, se asigna un puntaje y la suma total de estos indica el nivel de contaminación, que podría ser incipiente, moderada, severa y muy severa (MINAE-S, 2007).

La reducción de carga de contaminantes se analizó con *t*-student. Todos los análisis estadísticos se ejecutaron con ayuda del lenguaje de programación R versión 3.6.1.

Tabla 1

Información sobre los datos fisicoquímicos y microbiológicos recopilados para las muestras de aguas residuales de la PTAR Los Tajos y de aguas superficiales en el río Torres

	Río Torres			PTAR	
Punto de muestreo	Bajo los Ledezma (9°56'47''N y 84°06'55''O)	Aguas arriba de la descarga (9°57'39''N y 84°04'16''O)	Aguas debajo de la descarga (9°57'36''N y 84°08'28''O)	Entrada o Afluente (9°57'40''N y 84°04'14''O)	Salida o Efluente (9°57'38''N y 84°04'22''O)
Años de monitoreo	2011-2014 (Antes de la construcción de la PTAR)	2015-2020	2015-2020	2015-2020	2015-2020
Muestreo realizado por	LNA			PTAR (semanales) LNA (trimestrales)	
Tipo de muestreo	Muestras puntuales anuales	Muestras puntuales trimestrales	Muestras puntuales trimestrales	Muestras compuestas (24 horas) semanales	
Parámetros analizados	DBO, DQO, SSed, SST, STT, pH, Temperatura, Conductividad, $N-NH_4^+$, $P-PO_4^{3-}$, GyA $N-NO_3^-$, SAAM, Coliformes fecales			DBO, DQO, SSed, SST, STT, pH, Temperatura, Conductividad, $N-NH_4^+$, $P-PO_4^{3-}$, Caudal (2016-2020) + coliformes fecales (LNA)	

Nota: Fuente propia de la investigación.



Análisis y resultados

Se analizaron nueve muestreos en el río Torres en el punto de muestreo denominado Bajo Los Ledezma, esto antes de la puesta en marcha de la PTAR Los Tajos, desde el año 2012 hasta el 2015. Por otro lado, una vez que inició la operación de la PTAR, se continuó con el monitoreo del río Torres, reportando 30 muestreos desde el 2015 al 2020, tomando muestra en dos puntos específicos: aguas arriba y aguas abajo de la descarga de la PTAR.

En la tabla 2 se muestran los valores para los parámetros evaluados por la MIH, en primera instancia el promedio general (considerando todos los datos disponibles), seguido del promedio en época seca y finalmente en la lluviosa. Los resultados indican que existía contaminación severa en esos años, independientemente de la estacionalidad, lo cual concuerda con lo establecido por Herrera, Rodríguez, Rojas, Herrera, & Chaves (2013), quienes mencionan que la calidad del cauce del río Torres antes de la construcción de la PTAR estaba comprometida ambientalmente.

En la tabla 3 se encuentran las concentraciones y puntajes utilizados en la evaluación del río Torres con el MIH, después de la construcción de la PTAR. De los 30 muestreos realizados, en 15 se analizaron

los parámetros necesarios para el MIH, ocho realizados en estación seca y siete en lluviosa. Se observa que las medias del DBO y del $N-NH_4^+$ son mayores en época seca, caso contrario el porcentaje de saturación de oxígeno que disminuye debido a una menor aireación del agua. Esto indica mayor grado de contaminación debido a que las temperaturas son mayores, el caudal del río y el nivel de las aguas disminuyen, provocando un aumento en la concentración de algunos parámetros (Calvo & Mora, 2007b).

El resultado anterior concuerda con un estudio realizado en el 2007, donde el comportamiento de los valores mencionados es similar. En dicho estudio se estableció que el río Torres varía su calidad entre las categorías de “Contaminación severa” y “Contaminación muy Severa”, además hace énfasis en que la densidad poblacional relacionada con el cauce del río es alta, lo que se relaciona directamente con el grado de contaminación (Calvo & Mora, 2007a).

Si se comparan los resultados de aguas arriba y aguas abajo de la PTAR en época seca, se observa que en la mayoría de los muestreos el estado del río no presenta cambios en su nivel de contaminación (contaminación severa y muy severa). Caso contrario en época lluviosa, donde el aporte del efluente de la PTAR incide aumentando el grado de contaminación en seis de los siete muestreos.

Tabla 2

Evaluación de la calidad fisicoquímica del agua del Río Torres del 2012 al 2015 según la estacionalidad, utilizando la Metodología del Índice Holandés, (Contaminación, incipiente: +; moderada: ++; severa: +++; muy severa: ++++)

Promedio	DBO (mg L ⁻¹)	Puntaje	N-NH ₄ ⁺ (mg L ⁻¹)	Puntaje	Saturación Oxígeno (%)	Puntaje	Suma	Clasificación
General	30.0	5.0	10.0	5.0	77.3	2.0	12.0	+++
Época Seca	37.8	5.0	12.6	5.0	74.2	2.0	12.0	+++
Época Lluviosa	16.9	5.0	5.6	5.0	82.3	2.0	12.0	+++

Nota: Fuente propia de la investigación.



Tabla 3

Evaluación de la calidad fisicoquímica del agua del Río Torres del 2015 al 2020 según la estacionalidad, utilizando la Metodología del Índice Holandés (Contaminación, incipiente: +; moderada: ++; severa: +++; muy severa: ++++)

Época	Fecha	DBO ₅ mg/L		% Saturación O ₂		N-NH ₄ ⁺		Sumatoria y clasificación			
		Agua arriba	Agua abajo	Agua arriba	Agua abajo	Agua arriba	Agua abajo	Agua arriba	Clase	Agua abajo	Clase
Seca	abr-16	14 (4)	47 (5)	48 (4)	24 (5)	3 (4)	14 (5)	12	+++	15	++++
	abr-17	15 (4)	48 (5)	86 (2)	81 (2)	5 (4)	18 (5)	10	+++	12	+++
	dic-17	29 (5)	15 (4)	91 (1)	89 (2)	5 (5)	0.2 (1)	11	+++	7	++
	mar-18	23 (5)	41 (5)	87 (2)	74 (2)	7 (5)	23 (5)	12	+++	12	+++
	dic-18	15 (4)	36 (5)	99 (1)	95 (1)	6 (5)	13 (5)	10	+++	11	+++
	mar-19	18 (5)	42 (5)	52 (3)	34 (4)	16 (5)	39 (5)	14	++++	14	++++
	dic-19	37 (5)	49 (5)	7 (5)	12 (5)	8 (5)	16 (5)	15	++++	15	++++
	mar-20	42 (5)	66 (5)	10 (5)	7 (5)	15 (5)	19 (5)	15	++++	15	++++
	nov-15	12 (4)	18 (5)	100 (1)	92 (1)	0.7 (2)	4 (4)	7	++	10	+++
Lluviosa	jun-17	12 (4)	24 (5)	92 (1)	92 (1)	0.4 (1)	3 (4)	6	+	10	+++
	sep-17	11 (4)	26 (5)	99 (1)	96 (1)	1 (2)	2 (4)	7	++	10	+++
	jun-18	14 (4)	23 (5)	100 (1)	99 (1)	1 (3)	10 (5)	8	++	11	+++
	sep-18	14 (4)	30 (5)	87 (2)	84 (2)	3 (4)	14 (5)	10	+++	12	+++
	jun-19	5 (2)	12 (4)	96 (1)	91 (1)	2 (4)	17 (5)	7	++	10	+++
	sep-19	13 (4)	38 (5)	87 (2)	64 (3)	6 (5)	36 (5)	11	+++	13	++++

Media (puntos según MIH)

Nota: Fuente propia de la investigación.

Tabla 4

Caudales del río Torres y de la PTAR Los Tajos desde el 2015 al 2020 (n=30)

Caudal (L s)	Agua arriba		Agua abajo		Afluente / Efluente	
	Seca	Lluviosa	Seca	Lluviosa	Seca	Lluviosa
Promedio	2096	2880	2610	3481	446	592
Desviación	1025	1205	1045	1327	102	504
Mínimo	573	1115	1035	1651	140	152
Máximo	3335	4843	3823	5675	709	5734

Nota: Fuente propia de la investigación.

De las muestras de río se analizaron los siguientes parámetros: pH, Temperatura, Conductividad, Oxígeno disuelto, DBO, DQO, SST, STT, SSed, SAAM, N-NH₄⁺, P-PO₄³⁻, N-NO₃⁻ y coliformes fecales. Para todas las concentraciones reportadas de cada parámetro se calcularon las medias, desviación estándar, valores mínimos y máximos, el detalle se observa en la Tabla 5. Los mismos se dividieron según la época del año.

Para los parámetros de temperatura, pH, SST, STT, SSed y N-NO₃⁻ en ambos

puntos de muestreo no se obtuvieron diferencias significativas entre ellos, independientemente de la época de los muestreos, indicando así que el aporte de la PTAR para estos casos no se considera relevante.

Caso contrario para los parámetros de conductividad, DQO, N-NH₄⁺, P-PO₄³⁻, los cuales obtuvieron un valor de $P < 0.01$, lo que confirma la existencia de una diferencia significativa entre los distintos puntos del río y también entre las épocas del año. Para el caso de la conductividad la principal

Tabla 5
Parámetros fisicoquímicos analizados en el Río Torres aguas arriba y aguas abajo de la descarga de la PTAR, desde el 2015-2020 (n = 61)

Variable	Aguas arriba		Aguas abajo		KW	P
	Seca	Lluviosa	Seca	Lluviosa		
Temperatura (°C)	22.4 ± 2.7 (18.2 - 25.4)	22.84 ± 0.8 (22.0 - 24.3)	23.4 ± 2.7 (18.4 - 25.4)	23.3 ± 0.5 (22.0 - 23.5)	0.97	n.s.
pH	7.5 ± 0.5 (6.6 - 8.0)	7.7 ± 0.4 (7.1 - 8.6)	7.4 ± 0.6 (6.4 - 7.9)	7.7 ± 0.5 (7.0 - 8.5)	0.43	n.s.
Conductividad (µS cm ⁻¹)	384.6 ± 92.6 (220 - 523) a	285.1 ± 50.7 (223.0 - 355.0) c	511.0 ± 126.1 (278.0 - 695.0) b	379.1 ± 76.0 (275.0 - 508.0) a	13.38	**
DBO (mg L ⁻¹)	24.1 ± 10.8 (14.0 - 42.0) a	11.5 ± 3.2 (4.6 - 14.0) c	43.0 ± 14.4 (15.0 - 66.0) b	24.4 ± 8.3 (12.0 - 38.0) a	22.49	***
DQO (mg L ⁻¹)	56.9 ± 28.3 (32.0 - 120.0) bc	36.0 ± 16.8 (19.0 - 70.0) c	108.0 ± 37.7 (34.0 - 153.0) a	63.6 ± 31.2 (35.0 - 129.0) ab	13.12	**
Oxígeno disuelto (mg L ⁻¹)	4.7 ± 2.9 (0.5 - 7.7) a	7.3 ± 0.4 (6.6 - 7.9) b	4.1 ± 2.9 (0.5 - 7.5) a	6.8 ± 0.9 (4.9 - 7.5) ab	10.03	*
SST (mg L ⁻¹)	30.1 ± 12.8 (6.0 - 51.0)	47.6 ± 38.7 (11.0 - 127.0)	45.5 ± 16.3 (22.0 - 66.0)	60.6 ± 37.1 (24.0 - 129.0)	4.35	n.s.
STT (mg L ⁻¹)	360.4 ± 83.7 (239.0 - 512.0)	309.4 ± 98.4 (176.0 - 484.0)	434.5 ± 119.1 (262.0 - 598.0)	356.1 ± 97.4 (191.0 - 506.0)	4.41	n.s.
SSed (mL L ⁻¹)	0.1 ± 0.1 (0.0 - 0.3)	0.1 ± 0.1 (0.0 - 0.2)	0.1 ± 0.1 (0.0 - 0.3)	0.1 ± 0.1 (0.0 - 0.3)	0.33	n.s.
SAAM (mg L ⁻¹)	1.0 ± 0.5 (0.5 - 2.0) ab	0.6 ± 0.3 (0.1 - 1.1) c	1.7 ± 0.7 (0.5 - 2.3) a	1.2 ± 0.6 (0.7 - 2.1) a	9.31	*
N-NH ₄ ⁺ (mg L ⁻¹)	8.1 ± 4.8 (2.7 - 16.0) b	2.1 ± 1.9 (0.4 - 6.0) c	19.1 ± 11.0 (0.2 - 39.0) a	12.5 ± 11.8 (36.2 - 2.5) ab	15.95	**
P-PO ₄ ⁻³ (mg L ⁻¹)	0.7 ± 0.5 (0.4 - 1.7) ab	0.4 ± 0.2 (0.1 - 0.8) b	1.2 ± 0.6 (2.3 - 0.6) a	1.0 ± 0.4 (0.5 - 1.8) a	14.75	**
N-NO ₃ ⁻ (mg L ⁻¹)	15.8 ± 3.4 (13.0 - 20.0)	11.2 ± 3.9 (8.4 - 14.0)	18.0 ± 3.4 (14.0 - 22.0)	20.5 ± 7.8 (15.0 - 26.0)	4.1	n.s.
coliformes fecales (log10NMP 100mL ⁻¹)	6.1 ± 0.9 (4.9 - 7.4) b	6.2 ± 3.0 (5.7 - 6.9) b	6.9 ± 0.5 (5.9 - 7.4) b	7.27 ± 0.5 (6.7 - 7.9) a	16.63	***

Media ± desviación estándar (Min. - Máx.); KW: prueba de Kruskal-Wallis; n.s.: P>0.05; *: P<0.05; **: P<0.01; ***: P<0.001. Letras iguales indican no diferencias estadísticamente significativas de la prueba *a posteriori* de Least Significant Difference (LSD), P>0.05.

Nota: Fuente propia de la investigación.





diferencia se da entre los resultados de aguas arriba -época lluviosa y aguas abajo- época seca aumentando su valor, lo mismo ocurre con el DQO. Durante la época seca, las temperaturas en el Valle Central se mantienen entre los 16-25 ° y las precipitaciones son escasas (4% del total anual) (Solano & Villalobos, 2001). Es posible que durante la época seca se presente un aumento en las concentraciones de los contaminantes debido al bajo caudal del río y las fuentes puntuales y difusas de contaminación, perdiendo el factor de dilución proporcionado por las precipitaciones (tabla 4).

Con el mismo nivel de significancia, $N-NH_4^+$ presentó diferencias entre las épocas seca y lluviosa en aguas arriba con las muestras tomadas en época seca aguas abajo, el análisis estadístico indica que las concentraciones de este parámetro para el efluente no varían significativamente. Algo similar ocurre con $P-PO_4^{3-}$, que no presenta diferencias entre las épocas del año, pero sí entre los puntos de muestreo. El aumento de las concentraciones de nitrógeno amoniacal y fósforo aguas abajo es de esperarse, debido a que la PTAR no remueve nutrientes de las aguas residuales, debido a que por el momento solo brinda un tratamiento primario el cual remueve habitualmente un 10-20 % de fósforo total y 0 % de nitrógeno amoniacal (Metcalf & Eddy, 1996).

El resultado del DBO y coliformes fecales indican diferencias significativas para las distintas épocas en ambos puntos ($P<0.001$), siendo el punto de aguas abajo donde se presenta un aumento en la concentración. Dicha situación se considera típica, debido a que las aguas residuales domésticas que llegan a la PTAR acarrean principalmente materia orgánica como residuos de alimentos, detergentes y contaminantes de tipo microbiológico como *E. coli* y coliformes

fecales, entre otros; esto porque son mayoritariamente aguas negras con alto contenido de $N-NH_4^+$ por la orina y coliformes fecales por las excretas humanas y aguas grises provenientes de las cocinas, pilas y duchas (Díaz, Alvarado, & Camacho, 2012).

El promedio de los coliformes fecales en el río previo a la puesta en marcha de la PTAR fue de 7,423,750 NMP 100 mL⁻¹ demostrando así la existencia de vertidos de aguas negras al río previo a la PTAR. En los muestreos posteriores al 2015, los valores promedio de coliformes fecales en el agua arriba fueron de 4,417,551 NMP 100 mL⁻¹ y aguas abajo de 18,354,482 NMP 100 mL⁻¹. Lo anterior establece el impacto del efluente de la PTAR en el río, sin embargo, la mayor diferencia se evidencia entre los valores de aguas arriba y aguas abajo, especialmente en época lluviosa. Los valores reportados son concordantes con lo reportado en la literatura, que indica que el valor promedio de coliformes fecales ronda los $10^5 - 10^6$ NMP mL⁻¹, esto para las aguas residuales crudas (Metcalf & Eddy, 1996).

En la tabla 6 se observan los resultados de los parámetros analizados del afluente y efluente de la PTAR, divididos según la estacionalidad. En este caso, y al igual que para los datos del río, la temperatura, el pH y la conductividad no presentan diferencias significativas en los puntos de muestreo y en las distintas épocas del año, demostrando que estos parámetros se mantienen constantes durante el tratamiento. Cabe destacar que, durante el paso de las aguas por la PTAR, no se agregan sustancias químicas que influyan en los parámetros mencionados. El resto de los parámetros mostraron diferencias significativas ($P<0.001$) entre el afluente y el efluente, demostrando remoción. El DBO, DQO, SST, STT presentan diferencias entre las dos épocas estudiadas

Tabla 6
Parámetros fisicoquímicos analizados al afluente y efluente de la PTAR Los Tajos, desde el 2015 al 2020 (n=317)

Variable	Afluente		Efluente		KW	P
	Seca	Lluviosa	Seca	Lluviosa		
Temperatura (°C)	24.5 ± 1.6 (19.8 - 28.6)	24.4 ± 1.7 (19.4 - 28.4)	24.3 ± 1.5 (19.0 - 28.0)	24.4 ± 1.7 (19.4 - 29.3)	-	-
pH	7.5 ± 0.3 (6.7 - 8.1)	7.5 ± 0.3 (6.8 - 8.0)	7.5 ± 0.2 (6.8 - 8.2)	7.5 ± 0.2 (7.0 - 7.9)	-	-
Conductividad (µS cm ⁻¹)	761.8 ± 151.9 (446.7 - 1212.0)	669.0 ± 154.8 (340.9 - 1361.0)	739.0 ± 125.4 (410.7 - 1065.0)	627.3 ± 134.6 (353.0 - 1466.0)	-	-
DBO (mg L ⁻¹)	292.6 ± 99.0 (119.3 - 716.0) b	215.1 ± 80.9 (75.0 - 595.0) a	128.1 ± 38.3 (65.0 - 331.7) d	95.4 ± 32.2 (14.0 - 203.0) c	407.17	***
DQO (mg L ⁻¹)	706.5 ± 238.7 (248.0 - 1689) b	517.4 ± 314.8 (161.0 - 3064.0) a	326.6 ± 76.4 (106.0 - 713.0) d	230.9 ± 76.0 (40.0 - 715.0) c	385.39	***
SST (mg L ⁻¹)	420.0 ± 306.1 (92.0 - 2110.0) b	286.4 ± 247.8 (80.0 - 2386) a	99.1 ± 45.8 (20.0 - 377.6) d	77.1 ± 42.6 (6.0 - 288.0) c	455.51	***
STT (mg L ⁻¹)	841.5 ± 378.5 (410.0 - 3434.0) b	643.0 ± 338.7 (298.0 - 3966.0) a	508.5 ± 122.3 (106.0 - 1227.6) d	415.5 ± 89.7 (18.0 - 640.0) c	339.48	***
Ssed (mg L ⁻¹)	10.3 ± 6.8 (1.0 - 68.0) b	10.3 ± 6.8 (1.0 - 68.0) a	0.3 ± 1.3 (0.0 - 10.0) c	0.2 ± 0.5 (0.0 - 4.0) c	483.48	***
GyA (mg L ⁻¹)	95.3 ± 152.4 (12.2 - 516.0) b	18.3 ± 10.5 (2.4 - 40.2) a	8.4 ± 4.5 (3.4 - 17.2) c	8.5 ± 4.5 (0.4 - 21.0) c	40.88	***
SAAM (mg L ⁻¹)	4.5 ± 3.8 (1.8 - 7.2) ab	8.3 ± 2.1 (4.0 - 12.0) a	3.2 ± 1.8 (1.9 - 4.5) b	4.9 ± 1.6 (2.7 - 9.0) b	25.4	***
N-NH ₄ ⁺ (mg L ⁻¹)	42.4 ± 3.9 (32.8 - 49.3) b	32.4 ± 8.5 (15.0 - 46.0) a	42.4 ± 5.9 (31.2 - 56.1) b	29.4 ± 7.7 (14.0 - 46.0) a	21.94	***
P-PO ₄ ³⁻ (mg L ⁻¹)	24.4 ± 5.8 (12.8 - 34.9) b	138. ± 7.5 (2.1 - 26.4) a	16.7 ± 4.0 (6.4 - 24.5) a	10.3 ± 4.6 (1.0 - 18.4) a	34.73	***

Media ± desviación estándar (Min. - Máx.); KW: prueba de Kruskal-Wallis; ***: $P < 0.001$. Letras iguales indican no diferencias estadísticamente significativas de la prueba *a posteriori* de Least Significant Difference (LSD), $P > 0.05$.

Nota: Fuente propia de la investigación.





en cada punto de muestreo, demostrando la influencia del bajo caudal y concentración de contaminantes en época seca y las precipitaciones que permiten la dilución de estos en la lluviosa. Los SSed y las GyA presentan medias significativamente menores en el efluente, demostrando una remoción importante (95.0 % y 54.7 % respectivamente), lo cual coincide con el tratamiento físico de desarenado y desengrasado con que cuenta el pretratamiento de la PTAR Los Tajos, lo cual demuestra el efecto amortiguador que ejerce el sistema.

El SAAM presentó diferencias significativas solamente entre el afluente y el efluente evidenciando remoción (20.8 %), pero no entre la época seca y lluviosa. Se considera importante reducir la concentración del SAAM en las aguas residuales, debido a que puede provocar inconvenientes en algunos sistemas de tratamiento por la formación de espumas en etapas donde se utilice aireación, por ejemplo, en desengrasado, además de la afectación que puede provocar en los ríos (Ramírez, 2006).

Por otro lado, $N-NH_4^+$ muestra diferencias entre la época seca y la lluviosa en los mismos puntos de muestreo, pero no entre el afluente y efluente, esto se podría relacionar con la baja o nula remoción en la PTAR, considerando que con un sistema de sedimentación primaria como el de la PTAR, la remoción esperada para este parámetro es de cero. Unido a lo anterior, se puede considerar el fenómeno de concentración mencionado en época seca que se repite tanto en el afluente y efluente (Metcalf, & Eddy, 1991).

Finalmente, $P-PO_4^{3-}$ solamente presentó una diferencia entre la época seca del afluente respecto al resto, manteniendo la época lluviosa del afluente y ambas épocas del efluente sin cambios significativos. Lo anterior indica que las concentraciones de

fósforo que entra a la PTAR en época seca es mayor al resto. Dicho contaminante es común en las aguas residuales porque forma parte de la materia orgánica (proteínas y aminoácidos) y de la materia inorgánica que acarrea el agua (Teixeira, Sánchez, Gebara, Dall'Adlio, & Matsumoto, 2013). El porcentaje de remoción promedio obtenido para este parámetro fue de un 12.8 %, lo cual está dentro de lo esperado (teóricamente 10- 20 %) (Metcalf & Eddy, 1996).

Es importante mencionar que al ser una PTAR con solo tratamiento primario, el Decreto de Gradualidad le permite a la PTAR Los Tajos un efluente con límites de vertido mayores en 3 de los parámetros físico-químicos regulados a nivel nacional, estableciendo valores de 184 mg L⁻¹ de DBO, 460 mg L⁻¹ de DQO y 145 mg L⁻¹ de SST (Decreto 32133-S, 2004). Los límites anteriores son mayores a los establecidos por el Reglamento de Vertido y Reuso de aguas residuales (50 mg L⁻¹ de DBO, 150 mg L⁻¹ de DQO y 50 mg L⁻¹). Esta condición se mantiene mientras el Proyecto de Saneamiento avance en la construcción y arranque en las siguientes etapas, en ese momento la PTAR deberá cumplir con los límites mencionados (Decreto 33601, 2010).

En la Tabla 7 se detallan los valores de carga de contaminantes que ingresan y salen de la PTAR, entre ambas cantidades se demuestra que la remoción de carga es significativa ($P < 0.001$), demostrando así la capacidad de remoción de la PTAR. Los porcentajes de eficiencia de remoción mayores son para SSed (95.0%), SST (68.5 %), DBO (52.2 %) y DQO (49.8). Lo anterior es positivo considerando que para el tipo de tratamiento primario que reciben las aguas residuales en los Tajos se esperan valores de remoción 50-65 % de SST, 30-40 % de DBO y 30-40 % de DQO (Metcalf, & Eddy Inc., 1991).

Tabla 7
Cargas de contaminantes del Afluente y Efluente de la PTAR y porcentaje de eficiencia de remoción de la PTAR desde el 2015 al 2020

Variable	Carga Afluente	Carga Efluente	% Eficiencia remoción	% Eficiencia remoción teórica	Wilcoxon	P
DBO (Mg día ⁻¹)	10.8 ± 7.3 (1.6 – 97.1)	4.7 ± 3.3 (0.5 – 48.1)	52.2 ± 19.2 (0.0 – 88.8)	30 – 40	201295	***
DQO (Mg día ⁻¹)	27.1 ± 25.5 (2.1 – 314.2)	11.9 ± 7.4 (0.5 – 76.3)	49.8 ± 18.3 (0.0 – 91.8)	30 – 40	177906	***
SST (Mg día ⁻¹)	15.1 ± 19.0 (2.4 – 275.2)	3.7 ± 2.7 (0.2 – 21.8)	68.5 ± 18.5 (0.0 – 96.9)	50 – 65	201295	***
STT (Mg día ⁻¹)	32.9 ± 29.5 (6.1 – 337.9)	19.8 ± 12.8 (0.4 – 173.4)	31.5 ± 18.3 (0.0 – 90.0)	-	180901	***
GyA (Mg día ⁻¹)	1.2 ± 2.6 (0.1 – 20.2)	0.3 ± 0.2 (0.1 – 1.7)	54.7 ± 29.7 (0.0 – 100.0)	-	8001	***
SAAM (Mg día ⁻¹)	0.4 ± 0.6 (0.0 – 3.8)	0.3 ± 0.3 (0.1 – 2.1)	20.8 ± 42.0 (0.0 – 72.5)	-	3486	***
N-NH ₄ ⁺ (kg día ⁻¹)	3.2 ± 0.7 (1.3 – 4.3)	3.1 ± 1.0 (0.3 – 4.8)	3.1 ± 18.1 (0.0 – 46.3)	0	5151	***
P-PO ₄ ³⁻ (Mg día ⁻¹)	3.7 ± 1.5 (0.3 – 6.9)	2.4 ± 1.0 (0.2 – 4.7)	12.8 ± 14.3 (0.0 – 39.8)	10 – 20	4186	***

Media ± desviación estándar (Min. – Máx.); ***: $P < 0.001$.

Nota: Fuente propia de la investigación.





Cabe destacar que, para la mayoría de los parámetros, la remoción de contaminantes por la PTAR fue mayor en época seca que en lluviosa, lo anterior coincide con lo establecido por Jiménez (2012), quien indica que, a menor grado de contaminación de las aguas residuales, el porcentaje de remoción del sistema de tratamiento disminuye (Jiménez, 2012), además el tiempo de retención en el sistema aumenta por disminución del caudal a tratar, mejorando la remoción. Por otro lado, la diferencia no significativa entre los valores de entrada y salida de $N-NH_4^+$ deja en evidencia la necesidad de continuar con el proyecto de mejoramiento ambiental, pues un tratamiento primario no es suficiente para la remoción de este parámetro. Se tiene proyectada una etapa intermedia y segunda etapa de la PTAR con tratamiento secundario, para mejorar la remoción de materia orgánica (DBO y DQO), surfactantes (SAAM) y nutrientes ($N-NH_4^+$, $P-PO_4^{3-}$). La continuidad de este proyecto se encuentra a la espera de la conexión y rehabilitación de tuberías y colectores de los 11 cantones involucrados, acción que aumentaría el caudal de entrada a la PTAR, la cual se encuentra operando actualmente con aproximadamente un 20 % del caudal de diseño, proyectado a $2.81 \text{ m}^3 \text{ hora}^{-1}$.

En la Tabla 8 se muestra la sumatoria de las remociones de carga para los parámetros analizados, desde el 2015 al 2020, con fin de establecer la cantidad total de contaminantes removidos anualmente en la PTAR Los Tajos. Es importante destacar que, al retener los contaminantes en cuestión, se evitó la presencia de estos en el río, realizando un aporte ambiental considerable. Desde el inicio de operación de la PTAR y hasta el 2020 se removieron en total 12,290.0 Mg de DBO, 26,781.8 de Mg de DQO, 24,162.6 Mg de SST, 30,267.7 Mg de STT y 3,433.9 Mg de GyA de las aguas residuales. En menor cantidad, y considerando que la PTAR brinda solamente tratamiento primario, se removieron 213.0 Mg de SAAM, 0.8 de kg de $N-NH_4^+$ y 1.3 Mg de $P-PO_4^{3-}$.

Es importante recordar que la PTAR inició operaciones en el segundo semestre del 2015. Los años 2016 y 2020 son los que presentan mayor remoción de carga de contaminantes, excepto para GYA. La remoción promedio del 2017 se pudo ver afectada por las precipitaciones de ese año, que fueron las más altas desde el 2010 en la GAM (ICAFE, 2018), incluyendo el huracán Nate. Según el personal encargado de la operación de la PTAR, desde el 2018 se aumentó la centrifugación de

Tabla 8
Carga removida total anual de los distintos contaminantes de las aguas residuales que ingresaron a la PTAR Los Tajos

Parámetro	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Sumatoria
DBO (Mg año ⁻¹)	2,055.9	2,763.5	2,169.3	1,276.2	1,176.2	2,848.9	12,290.0
DQO (Mg año ⁻¹)	ND	6,738.9	4,279.2	2,334.0	3,804.9	9,634.8	26,791.8
SST (Mg año ⁻¹)	2,360.1	4,752.8	3,429.4	1,863.6	3,790.6	7,966.1	24,162.6
STT (Mg año ⁻¹)	7,905.6	5,247.5	3,234.9	2,042.5	3,831.2	8,006.0	30,267.7
GYA (Mg año ⁻¹)	170.6	227.8	80.7	110.8	2,359.4	484.6	3,433.9
SAAM (Mg año ⁻¹)	48.8	33.2	0.0	5.8	0.0	125.2	213.0
$N-NH_3$ (kg año ⁻¹)	0.0	0.1	0.04	0	0.03	0.6	0.8
$P-PO_4^{3-}$ (Mg d ⁻¹)	0.0	0.4	0.4	0.1	0.4	0.0	1.3

Nota: Fuente propia de la investigación.



lodos, aumentando así la extracción de sólidos del agua tratada, lo cual se evidencia en la tabla para SST y STT. Conforme han pasado los años, el caudal que ingresa a la PTAR ha crecido paulatinamente, lo cual conlleva a la operación sistemática de la planta, modificando funciones propias del tratamiento, como el tiempo de retención en sedimentadores, niveles de lodos en espesadores, caudal de entrada a digestores, entre otras muchas.

Conclusiones

Se estableció que el río Torres ya presentaba un nivel de contaminación severo antes de la construcción de la PTAR, sin embargo, durante los muestreos aguas arriba y aguas abajo se comprobó que la calidad del río no cambia en época seca, pero sí lo hace en época lluviosa, aumentando un nivel de contaminación. En época lluviosa se da un fenómeno de arrastre de materiales en las alcantarillas y tuberías, lo que puede provocar un aumento en la concentración de los parámetros DBO, SST, STT, entre otros; además se espera un porcentaje de remoción menor en esta época, lo que podría atribuirse a la disminución del tiempo de retención por la carga hidráulica.

Se demostró el aporte de coliformes fecales de la PTAR al río Torres aguas abajo. La mayor diferencia en los valores se evidencia entre los datos de aguas arriba y aguas abajo, en época lluviosa.

Se comprobó que la PTAR remueve efectivamente los contaminantes esperados para un tratamiento primario, superando el rango esperado según la literatura para DBO (52.2%), DQO (49.8 %) y SST (68.5 %). Por otro lado, se obtuvo un porcentaje de 31.5 para STT, 54.7 para GyA y 20.8 para SAAM. Los porcentajes de remoción

de N-NH_4^+ y P-PO_4^{3-} obtenidos fueron bajos, sin embargo, es de esperar para este tipo de tratamiento.

En el periodo comprendido del 2015 y 2020, la PTAR removió en total 12,290.0 Mg de DBO, 26,781.8 de Mg de DQO, 24,162.6 Mg de SST, 30,267.7 Mg de STT y 3,433.9 Mg de GyA de las aguas residuales, principalmente. En menor cantidad, y considerando que la PTAR brinda solamente tratamiento primario, se removieron 213.0 Mg de SAAM, 0.8 de kg de N-NH_4^+ y 1.3 Mg de P-PO_4^{3-} .

Se deja en evidencia la necesidad de continuar con el Proyecto de Mejoramiento Ambiental del Área Metropolitana de San José y construir la etapa intermedia y segunda etapa de la PTAR con tratamiento secundario, con el fin de mejorar la remoción de materia orgánica (DBO y DQO), surfactantes (SAAM) y nutrientes (N-NH_4^+ , P-PO_4^{3-}), aportando así positivamente la calidad del Río Torres como cuerpo receptor.

Agradecimiento

Al personal de la PTAR Los Tajos y del Laboratorio Nacional de Aguas, ambos del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, quienes realizaron los muestreos y/o generaron los datos analizados en este trabajo: Andrés Fonseca Picado, Carlos Salas Chacón, Ernesto Alfaro Arrieta, Eduardo Salazar Mesén, Sergio Álvarez McInerney, Juan Alfaro Lara, José Miguel Ramírez Corrales. Además, a las direcciones de ambos departamentos por la autorización del uso de datos: Olman Jiménez Rodríguez (PTAR Los Tajos) y Darner Mora Alvarado (LNA). A la UEN Gestión Ambiental del AYA, Estudios Básicos, quienes generaron los datos de caudal analizados. Finalmente, a Emilia Sanabria Mora por su colaboración incondicional.



Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener algún conflicto de interés.

Declaración de la contribución de los autores

Todos los autores afirmamos que se leyó y aprobó la versión final de este artículo.

El porcentaje total de contribución para la conceptualización, preparación y corrección de este artículo fue el siguiente: C.M.A. 25%, C.A.C 25%, J.P.M 25% y I. V.G. 25%.

Declaración de disponibilidad de los datos

Los datos que respaldan los resultados de este estudio serán puestos a disposición por el autor correspondiente [C.M.A], previa solicitud razonable.

Referencias

- Acosta, R. (2008). *Saneamiento ambiental e higiene de los alimentos*. Brujas. https://www.academia.edu/8216667/Saneamiento_ambiental
- Angulo, F. (2015). Gestión del Recurso Hídrico y Saneamiento en Costa Rica. *Vigésimo primer informe del Estado de la Nación y Desarrollo Humano Sostenible*. <http://repositorio.conare.ac.cr/handle/20.500.12337/396>
- ARESEP. (2017). *Política Nacional de saneamiento de aguas residuales*. Costa Rica. <https://aresep.go.cr/alcantarillado/normativa/2062-la-politica-nacional-de-saneamiento-de-aguas-residuales-pnsar>
- Ballester, M. (2013). Organizaciones comunales prestadoras del servicio de agua universalizan el acceso y disminuyen la pobreza. *Revista de Ciencias ambientales*, 45(1), 23-40. <https://doi.org/10.15359/rca.45-1.3>

- Calvo, G., & Mora, J. (2007a). Evaluación y clasificación preliminar de la calidad de agua de la cuenca del río Tárcoles y el Reventazón. Parte III: Calidad de cuerpos receptores de agua, según el sistema holandés de valoración. *Tecnología en marcha*, 20(4), 59-67. https://181.193.125.13/index.php/tec_marcha/article/view/452/380
- Calvo, G., & Mora, J. (2007b). Evaluación y clasificación preliminar de la calidad del agua de la cuenca del río Tárcoles y el Reventazón. Parte I: Análisis de la contaminación de cuatro ríos del área metropolitana. *Tecnología en Marcha*, 20(2), 3-9. https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/46/45
- Díaz, E., Alvarado, A., & Camacho, K. (2012). El tratamiento de agua residual doméstica para el desarrollo local sostenible: El caso de la técnica del sistema unitario de tratamiento de aguas, nutrientes y energía (SUTRANE) en San Miguel Almaya, México. *Quiverra*, 14(1), 78-97. <https://www.redalyc.org/pdf/401/40123894005.pdf>
- Echeverría, J., & Cantillo, B. (2013). Instrumentos económicos para la gestión del agua. *Revista de Ciencias Ambientales*, 45(1), 13-22. doi: <https://doi.org/10.15359/rca.45-1.2>
- FAO. (2012). El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura. La gestión de los sistemas en situación de riesgo (2.ª ed.). *Mundi-Prensa*. <http://www.fao.org/3/i1688s/i1688s.pdf>
- Herrera, J., Rodríguez, S., Rojas, F., Herrera, E., & Chaves, M. (2013). Variación temporal y espacial de la calidad de las aguas superficiales en la subcuenca del río Virilla (Costa Rica) entre 2006 y 2010. *Revista de Ciencias Ambientales*, 45(1), 51-62. <https://doi.org/10.15359/rca.45-1.5>
- ICAFE. (2018). Análisis histórico de lluvias. <http://www.icafe.cr/analisis-historico-de-lluvias/>
- Jiménez, O. (2012). *Revisión de los límites de DBO y SST especificados para el agua tratada de la primera etapa de la planta de tratamiento de aguas residuales, Los Tajos*. *Hidrogenesis*, 10(1) 65-71. <https://es.scribd.com/document/386624821/Revista-Hidrogenesis-Vol-10-No-1-2012>
- Martínez, G., & Villalejo, V. (2018). La gestión integrada de los recursos hídricos: Una necesidad de estos tiempos. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 39(1), 58-72. <http://scielo.sld.cu/pdf/riha/v39n1/riha05118.pdf>



- Metcalf, & Eddy Inc. (1991). Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, and Reuse (3.rd ed.). In G. Tchobanoglous, & F. L. Burton (Eds.). McGraw-Hill.
- MINAE-S. (2004). Decreto 32133. Declaratoria de interés público y necesidad social el diseño, financiamiento, ejecución, operación y mantenimiento de obras para la recolección, tratamiento y disposición final de aguas residuales, generados en centros urbanos. http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=54049&nValor3=102115&strTipM=TC
- MINAE-S. (2007). DIGECA. Decreto N.º 33903. Reglamento para la evaluación y clasificación de la calidad de los cuerpos de agua superficiales. http://www.digeca.go.cr/sites/default/files/de_33903reglamento_evaluacion_clasificacion_cuerpos_de_agua_0.pdf
- MINAE-S. (2010). Decreto 33601. Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales. http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=59524&nValor3=83250
- Mora, D., & Portuquez, C. (2019). Agua para consumo humano por provincias y saneamiento por regiones manejados en forma segura en zonas urbanas y rurales de Costa Rica al 2018. *Tecnología en Marcha*, 31(2). <https://doi.org/10.18845/tm.v31i2.3625>
- ONU-Agua. (2019). *Informe mundial de Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2019: No dejar a nadie atrás*. UNESCO.
- Presidencia de la República. (2016). *Planta de tratamiento Los Tajos genera beneficios adicionales al saneamiento*. <https://www.presidencia.go.cr/comunicados/2016/03/planta-de-tratamiento-los-tajos-genera-beneficios-adicionales-al-saneamiento/>
- Ramallo, R. (1996). *Tratamiento de aguas residuales*. Reverté.
- Ramírez, J. (2006). Detergentes orgánicos sintéticos y ambiente. *Hidrogénesis*, 4(1), 22-27. <https://docplayer.es/10741484-Detergentes-organicos-sinteticos-y-ambiente.html>
- Reynolds, K. (2002). Tratamiento de aguas residuales en Latinoamérica: Identificación del problema. *De la Llave, Agua Latinoamericana*, 1-4. <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2007/10/Tratamiento-aguas-residuales-Latinoamerica.pdf>
- Rodríguez, A., Letón, P., Rosal, R., Dorado, M., Villar, S., & Sanz, J. (2006). *Informe de vigilancia tecnológica: Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales*. CITME. https://www.madrimasd.org/uploads/ormacionidi/biblioteca/publicacion/doc/VT/2_Tratamientos_avanzados_de_aguas_residuales_industriales.pdf
- Rojas, R. (2002). Gestión integral de tratamiento de aguas residuales. *Sistemas de tratamiento de aguas residuales*. OMS. <http://files.control-ambiental5.webnode.com.co/200000093-9097e9190c/GESTION%20INTEGRAL%20DEL%20TRATAMIENTO%20AR.pdf>
- Solano, J., & Villalobos, R. (2001). Aspectos fisiográficos aplicados a un bosquejo de regionalización geográfico climático de Costa Rica. *Top. Meteor. Oceanog.*, 8(1), 26-39.
- Teixeira, G., Sánchez, I., Gebara, D., Dall'Adlio, M., & Matsumoto, T. (2013). Remoción de fósforo de diferentes aguas residuales en reactores aeróbios de lecho fluidizado trifásico con circulación interna. *Fac. Ing. Univ. Antioquia* (67), 172-182.
- Valverde, R. (2013). Disponibilidad, distribución, calidad y perspectivas del agua en Costa Rica. *Revista de Ciencias Ambientales*, 45(1), 5-12. <https://doi.org/10.15359/rca.45-1.1>
- Vargas, E., & Marín, A. (2016). Costa Rica demanda una gestión integral del recurso hídrico: Escenario latinoamericano y la realidad país. *InterSedes*, 17(35). <https://doi.org/10.15517/isucr.v17i35.25565>



Aporte ambiental de la planta de tratamiento de aguas residuales Los Tajos en la remoción de contaminantes fisicoquímicos y microbiológicos (Carmen Mora-Aparicio • Carolina Alfaro-Chinchilla • Junior Pastor Pérez-Molina • Ilena Vega-Guzmán) *Uniciencia* is protected by Attribution-NonCommercial-NoDerivs 3.0 Unported (CC BY-NC-ND 3.0)