



Artículo original / Original article

Niveles de edad de lodos en la reducción de carga orgánica y sólidos en una planta de tratamiento de aguas residuales

Sludge age levels in organic and solids load reduction in a wastewater treatment plant

Juan Del Carmen Mimbela-Leon^{1*} 

¹Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, Perú

Recibido: 19/02/2025

Aceptado: 01/05/2025

Publicado: 25/07/2025

*Autor de correspondencia: jmimbela@unitru.edu.pe

Resumen: La optimización del tiempo de retención celular en sistemas de lodos activados constituye un desafío técnico y ambiental clave para mejorar la eficiencia del tratamiento de aguas residuales en el Perú y a nivel global. Para ello, se buscó determinar la influencia del manejo de la edad de los lodos sobre la eficiencia de remoción de la carga orgánica (SRT), medida con la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), la Demanda Química de Oxígeno y de los Sólidos Suspendedos Totales (SST) en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Pachacútec, que se denominará de aquí en adelante PTAR Pachacútec, ubicada en el distrito de Ventanilla, Callao. El estudio fue de tipo aplicado, cuantitativo, experimental e hipotético-deductivo, mediante 120 observaciones bajo cuatro condiciones de tiempo de retención celular: baja (08-12 días), media (19-21 días), alta (25 días) y control (20 días). Los resultados evidenciaron diferencias altamente significativas ($p < 0.001$), siendo la mayor edad del lodo la más eficiente (DBO₅: 82.11%, DQO: 74.10%), con correlación positiva muy fuerte ($\rho > 0.92$). Se concluye que el manejo optimizado de la edad de los lodos constituye una estrategia eficaz para mejorar la eficiencia de las PTAR en contextos urbanos costeros.

Palabras clave: carga orgánica; remoción; tratamiento de aguas residuales; aireación extendida; SRT; DBO₅; DQO; SST

Abstract: Optimizing cell retention time in activated sludge systems is a key technical and environmental challenge for improving wastewater treatment efficiency in Peru and globally. To this end, the objective was to determine the influence of sludge age management on organic load removal efficiency (TRS), measured by Biochemical Oxygen Demand (BOD₅), Chemical Oxygen Demand, and Total Suspended Solids (TSS) at the Pachacútec Wastewater Treatment Plant, hereafter referred to as PTAR Pachacútec, located in the Ventanilla district, Callao. The study was applied, quantitative, experimental, and hypothetical-deductive, through 120 observations under four cell retention time conditions: low (8-12 days), medium (19-21 days), high (25 days), and control (20 days). The results showed highly significant differences ($p < 0.001$), with the highest sludge age being the most efficient (BOD₅: 82.11%, COD: 74.10%), with a very strong positive correlation ($\rho > 0.92$). It is concluded that optimized sludge age management is an effective strategy for improving WWTP efficiency in coastal urban settings.

Keywords: organic load; removal; wastewater treatment; extended aeration; TSS; BOD₅; COD; TSS

1. Introducción

La gestión de los lodos activados, particularmente el control del tiempo promedio de retención celular, también denominado edad de lodos, constituye un parámetro operativo esencial para optimizar el desempeño de las plantas de tratamiento de aguas residuales. Este indicador, reconocido desde inicios del siglo XX como clave en los sistemas de lodos activados, incide directamente en la remoción de contaminantes orgánicos y sólidos suspendidos, contribuyendo a la obtención de efluentes de mejor calidad. Organismos internacionales, como la OCDE, han subrayado la necesidad de integrar el manejo eficiente de lodos dentro de un marco de economía circular, donde el tratamiento de aguas residuales permita no solo la depuración del recurso, sino también la recuperación de nutrientes y energía.

A pesar de los avances tecnológicos, la problemática de la insuficiente remoción de contaminantes persiste a escala mundial. La UNESCO estima que más del 80% de las aguas residuales se vierten sin tratamiento, generando impactos ambientales como eutrofización, pérdida de oxígeno disuelto y degradación de ecosistemas acuáticos. La cobertura del tratamiento varía significativamente por región: mientras Europa y Norteamérica alcanzan altos niveles de depuración, en América Latina más de la mitad de las aguas servidas aún no reciben un tratamiento adecuado. Esta disparidad compromete el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, particularmente el ODS 6, que busca garantizar agua limpia y saneamiento.

En el Perú, la situación refleja retos similares. Aunque la cobertura de tratamiento se ha incrementado en las últimas décadas, todavía existen regiones sin infraestructura operativa y plantas que funcionan al límite de su capacidad. Las deficiencias en el control de parámetros críticos, como la edad del lodo, se traducen en efluentes que exceden los límites máximos permisibles de materia orgánica y sólidos suspendidos, afectando la calidad del agua superficial y la salud pública. Un caso emblemático es la provincia del Callao, históricamente impactada por vertimientos de aguas residuales crudas al mar. La puesta en marcha de la PTAR Taboada marcó un hito al ampliar la cobertura de tratamiento, aunque su enfoque en procesos preliminares mantiene la necesidad de optimizar parámetros biológicos para alcanzar mayores niveles de depuración.

Este escenario revela un vacío operativo y científico: la insuficiencia en la optimización del tiempo de retención celular como estrategia para reducir la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) y los sólidos suspendidos totales (SST) en el efluente. La presente investigación busca determinar la influencia del manejo de la edad de los lodos sobre la eficiencia de remoción de la carga orgánica (SRT), medida con la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), la Demanda Química de Oxígeno y de los Sólidos Suspendidos Totales (SST) en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Pachacútec, ubicada en el distrito de Ventanilla, Callao, en el Perú que opera con tecnología de lodos activados con aireación extendida.

2. Materiales y métodos

2.1. Enfoque y tipo de investigación

El estudio adoptó un enfoque cuantitativo, sustentado en la medición precisa de variables físico-químicas del agua residual tratada. Este enfoque permitió establecer relaciones causales entre la edad del lodo y los niveles de carga orgánica —medida mediante la Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días (DBO₅) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO)— así como los Sólidos Suspendidos Totales (SST). La investigación fue de tipo experimental, dado que se manipuló la variable independiente (edad del lodo) para observar su efecto en las variables dependientes (DBO₅, DQO y SST), bajo condiciones reales de operación de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Pachacútec. El nivel de investigación fue explicativo, orientado a determinar el grado de influencia del manejo de la edad de los lodos en la eficiencia de remoción de contaminantes.

2.2. Diseño experimental

Se utilizó un diseño experimental clásico con grupo control y posttest, aplicado en el Reactor 04 de la PTAR Pachacútec, un sistema de lodos activados con aireación extendida. Se establecieron dos condiciones:

Grupo control: operación con edad de lodo estándar (referencial).

Grupo experimental: operación con variaciones programadas de la edad del lodo (menor, intermedia y mayor).

Ambos grupos fueron evaluados en el mismo periodo operativo, bajo condiciones similares de caudal, carga hidráulica y temperatura. Se realizaron réplicas experimentales para garantizar la validez interna de los resultados.

2.3. Población y muestra

La población estuvo constituida por sistemas de tratamiento de aguas residuales urbanas que emplean procesos de lodos activados. La muestra correspondió a las aguas residuales tratadas en la PTAR Pachacútec bajo régimen controlado. Se establecieron tres tratamientos experimentales asociados a diferentes rangos de edad del lodo: 10 a 18 días, 19 a 22 días y de 23 a 33 días.

Cada tratamiento incluyó tres réplicas experimentales para asegurar consistencia en los resultados.

2.4. Técnicas e instrumentos

Se aplicaron técnicas de muestreo y análisis físico-químico conforme a metodologías estandarizadas:

Muestreo compuesto de agua tratada (efluente secundario) en cada tratamiento.

DBO₅: método 5210B, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2022).

DQO: método 5220B, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2022).

SST: filtración y secado a 103–105 °C, método 2540D del mismo manual.

2.5. Procesamiento y análisis de datos

Los datos obtenidos fueron procesados mediante estadística inferencial. Se aplicó análisis de varianza (ANOVA) para comparar medias de DBO₅ y SST entre los tratamientos, seguido de una prueba post hoc de Tukey para identificar diferencias significativas. Asimismo, se empleó regresión lineal para modelar la relación entre la edad del lodo y la eficiencia de remoción de contaminantes. Los análisis se realizaron con los softwares IBM SPSS v.27 y RStudio, fijando un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$.

3. Resultados

3.1. Presentación y análisis de resultados

De acuerdo con los resultados presentados en la Tabla 1, se observa que para la remoción de DBO₅ (%), la condición de edad de lodo media (rango entre 19 y 22 días) muestra la mayor eficiencia de remoción de DBO₅ (96.882 %) con una desviación estándar moderada (± 3.07), indicando consistencia en el proceso. A medida que disminuye la edad del lodo, también disminuye la remoción de DBO₅, siendo la condición baja (rango entre 10 a 18 días) una remoción de DBO (95.227 %) y en el rango alto (rango entre 23 y 33 días) una remoción menos eficiente de DBO con 94.551%.

Los resultados para la remoción de DQO fueron los siguiente: En la Tabla 01, se observa que para la remoción de DQO (%), la condición de edad de lodo media (rango entre 19 y 22 días) muestra

la mayor eficiencia de remoción de DQO (96.372 %) con una desviación estándar moderada (± 3.07), indicando consistencia en el proceso. A medida que disminuye la edad del lodo, también disminuye la remoción de DQO, siendo la condición baja (rango entre 10 a 18 días) una remoción de DQO (95.227 %) y en el rango alto (rango entre 23 y 33 días) una remoción menos eficiente de DQO con 93.810%.

Los resultados para la remoción de SST fueron los siguiente: En la Tabla 01, se observa que la remoción de SST, en las tres condiciones de rango de edad de lodos (media, baja y alta) arroja porcentajes de remoción muy parecidos 98.416, 98.521 y 98.636 respectivamente.

Tabla 1. Resultados de remoción de DBO, DQO y SST con los diferentes rangos de edad de lodos

Nº	Rango de edad de lodos	% Remoción de DBO	% Remoción de DQO	% Remoción de SST
1	De 10 a 18 días	95.825	95.227	98.521
2	De 19 a 22 días	96.882	96.372	98.416
3	De 23 a 33 días	94.551	93.810	98.636

Tabla 2. Resultados de la remoción de carga orgánica, medida en Demanda Bioquímica de Oxígeno y Demanda Química de Oxígeno, y de sólidos suspendidos totales, mediante la manipulación de la edad de lodos (10 a 18 días)

RESULTADOS DE LA REMOCIÓN DE CARGA ORGÁNICA MEDIDA EN DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO Y DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO Y SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES Y LA MANIPULACIÓN DE LA EDAD DE LODOS (10 a 18 días)

Fecha	N°	Edad de lodo	Caudal de Ingreso	DBO Ingreso	DQO Ingreso	SST Ingreso	Volumen Reactor 04 m3	SSVLM Reactor 4 mg/L	Caudal de lodo dispuesto R4 m3/día	SSV lodo salida en R4 mg/L	Reactor 04 Caudal tratado	SSV Efluente del R4	DQO Efluente del R5	SST Efluente del R4	DBO Efluente del R4	REDUCCIÓN DE DBO	% DE REDUCCIÓN DE DBO	REDUCCIÓN DE DQO	% DE REDUCCIÓN DE DQO	REDUCCIÓN DE SST	% DE REDUCCIÓN DE SST
30/12/2024	1	9.52	4,626.00	810.24	1266.00	330	12,149.00	3,090.00	500.00	7,812.80	4,203.00	8.36	51.00	11.00	28.05	782.19	96.538	1215.00	95.972	319.00	96.667
13/09/2024	2	10.69	2,866.67	813.44	1271.00	600	12,149.00	1,714.96	414.00	4,651.20	3,940.00	6.08	48.00	8.00	26.4	787.04	96.755	1223.00	96.223	592.00	98.667
11/10/2024	3	11.28	2,925.67	620.80	970.00	540	12,149.00	1,916.72	514.00	3,936.80	3,846.00	10.64	47.00	14.00	25.85	594.95	95.836	923.00	95.155	526.00	97.407
11/10/2024	4	11.28	2,925.67	620.80	970.00	540	12,149.00	1,916.72	514.00	3,936.80	3,846.00	10.64	47.00	14.00	25.85	594.95	95.836	923.00	95.155	526.00	97.407
10/08/2024	5	11.87	2,981.00	416.00	650.00	425	12,149.00	1,722.72	605.00	2,903.20	4,124.00	1.52	32.30	2.00	22.55	393.45	94.579	617.70	95.031	423.00	99.529
27/09/2024	6	13.22	2,843.33	734.08	1147.00	725	12,149.00	1,808.08	310.00	5,228.80	3,846.50	10.64	31.00	14.00	17.05	717.03	97.677	1116.00	97.297	711.00	98.069
20/12/2024	7	13.92	4,337.00	676.48	1057.00	780	12,149.00	2,220.00	235.00	8,162.40	4,197.00	4.56	39.00	6.00	21.45	655.03	96.829	1018.00	96.310	774.00	99.231
16/08/2024	8	13.97	2,698.67	684.80	1070.00	330	12,149.00	1,575.28	408.00	3,336.40	3,771.00	2.28	36.00	3.00	19.8	665.00	97.109	1034.00	96.636	327.00	99.091
7/09/2024	9	14.49	3,062.67	617.60	965.00	270	12,149.00	2,079.68	499.00	3,427.60	4,933.50	6.84	43.00	9.00	23.65	593.95	96.171	922.00	95.544	261.00	96.667
14/01/2025	10	14.57	4,519.00	524.80	820.00	945	12,149.00	2,440.00	519.00	3,883.60	4,305.00	4.56	55.00	6.00	30.25	494.55	94.236	765.00	93.293	939.00	99.365
23/08/2024	11	15.27	2,654.00	789.12	1233.00	640	12,149.00	1,714.96	441.00	3,055.20	3,769.50	4.56	41.00	6.00	22.55	766.57	97.142	1192.00	96.675	634.00	99.063
24/08/2024	12	15.27	2,654.00	789.12	1233.00	640	12,149.00	1,714.96	441.00	3,055.20	3,769.50	4.56	41.00	6.00	22.55	766.57	97.142	1192.00	96.675	634.00	99.063
30/11/2024	13	15.49	4,789.50	590.72	923.00	595	12,149.00	2,700.00	608.00	3,435.20	5,428.00	5.32	73.00	7.00	40.15	550.57	93.203	850.00	92.091	588.00	98.824
13/01/2025	14	15.55	4,471.50	677.76	1059.00	700	12,149.00	2,410.00	591.00	3,169.20	4,506.50	2.28	48.00	3.00	26.4	651.36	96.105	1011.00	95.467	697.00	99.571
12/08/2024	15	15.96	2,629.67	590.08	922.00	615	12,149.00	1,373.52	350.00	2,964.00	3,690.00	2.28	25.00	3.00	13.75	576.33	97.670	897.00	97.289	612.00	99.512
8/11/2024	16	16.02	4,335.50	622.72	973.00	655	12,149.00	2,030.00	420.00	3,587.20	3,608.50	9.12	50.00	12.00	27.5	595.22	95.584	923.00	94.861	643.00	98.168
10/01/2025	17	16.12	4,623.50	715.52	1118.00	745	12,149.00	2,660.00	548.00	3,625.20	4,037.50	4.56	32.00	6.00	17.6	697.92	97.540	1086.00	97.138	739.00	99.195
10/01/2025	18	16.12	4,623.50	715.52	1118.00	745	12,149.00	2,660.00	548.00	3,625.20	4,037.50	4.56	32.00	6.00	17.6	697.92	97.540	1086.00	97.138	739.00	99.195
20/11/2024	19	16.39	4,595.50	663.04	1036.00	675	12,149.00	1,990.00	316.00	4,603.07	3,338.00	6.08	60.00	8.00	37.4	625.64	94.359	976.00	94.208	667.00	98.815
19/11/2024	20	17.19	4,370.50	673.28	1052.00	760	12,149.00	2,050.00	420.00	3,393.93	3,816.00	6.08	65.00	8.00	35.75	637.53	94.690	987.00	93.821	752.00	98.947
9/09/2024	21	17.63	2,619.33	794.88	1242.00	550	12,149.00	1,707.20	315.00	3,655.60	3,640.50	6.84	42.00	9.00	23.1	771.78	97.094	1200.00	96.618	541.00	98.364
27/11/2024	22	17.64	4,522.00	668.16	1044.00	715	12,149.00	2,410.00	296.00	5,555.60	4,060.00	3.80	94.00	5.00	51.7	616.46	92.262	950.00	90.996	710.00	99.301
7/10/2024	23	18.01	2,804.67	846.72	1323.00	650	12,149.00	1,722.72	355.00	3,100.80	3,854.00	15.96	50.00	21.00	27.5	819.22	96.752	1273.00	96.221	629.00	96.769
27/12/2024	24	18.05	4,637.00	552.96	864.00	590	12,149.00	2,890.00	378.00	5,099.60	4,578.00	3.80	69.00	5.00	37.95	515.01	93.137	795.00	92.014	585.00	99.153
5/10/2024	25	18.47	3,083.67	464.64	726.00	665	12,149.00	1,482.16	251.00	3,625.20	4,292.00	15.20	52.00	20.00	28.6	436.04	93.845	674.00	92.837	645.00	96.992
																	95.825		95.227		98.521

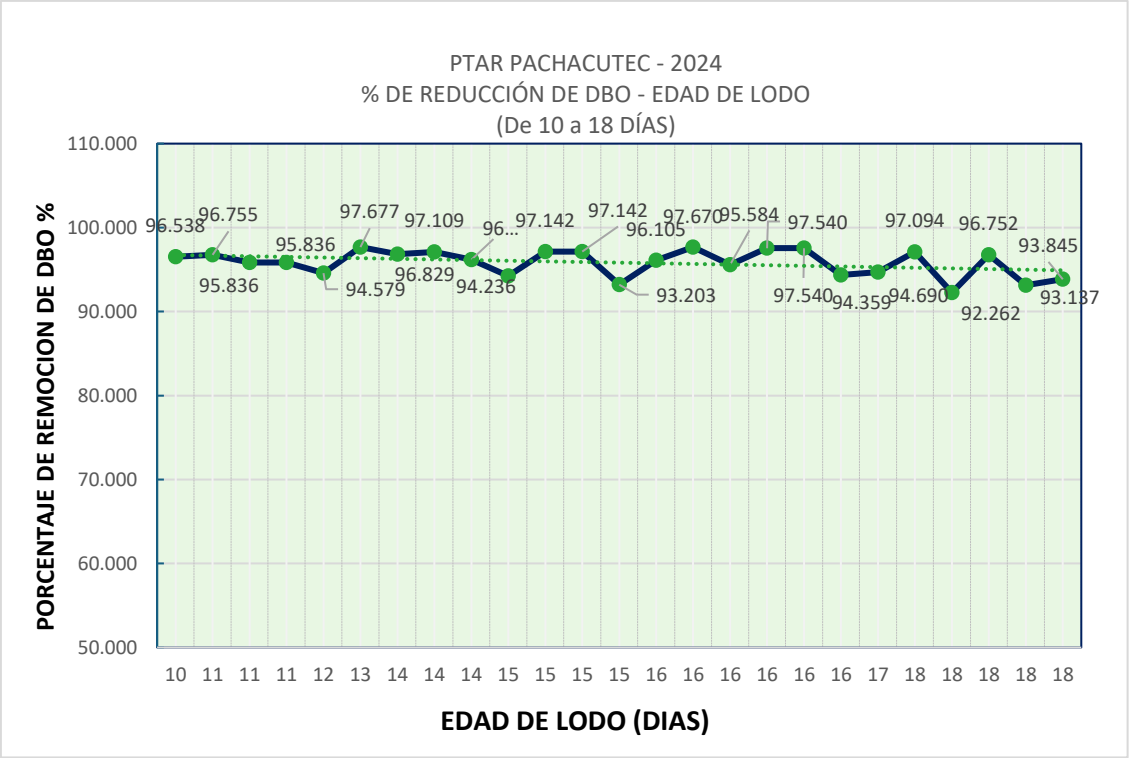


Figura 1. Porcentaje de remoción de DBO % (10 a 18 días)

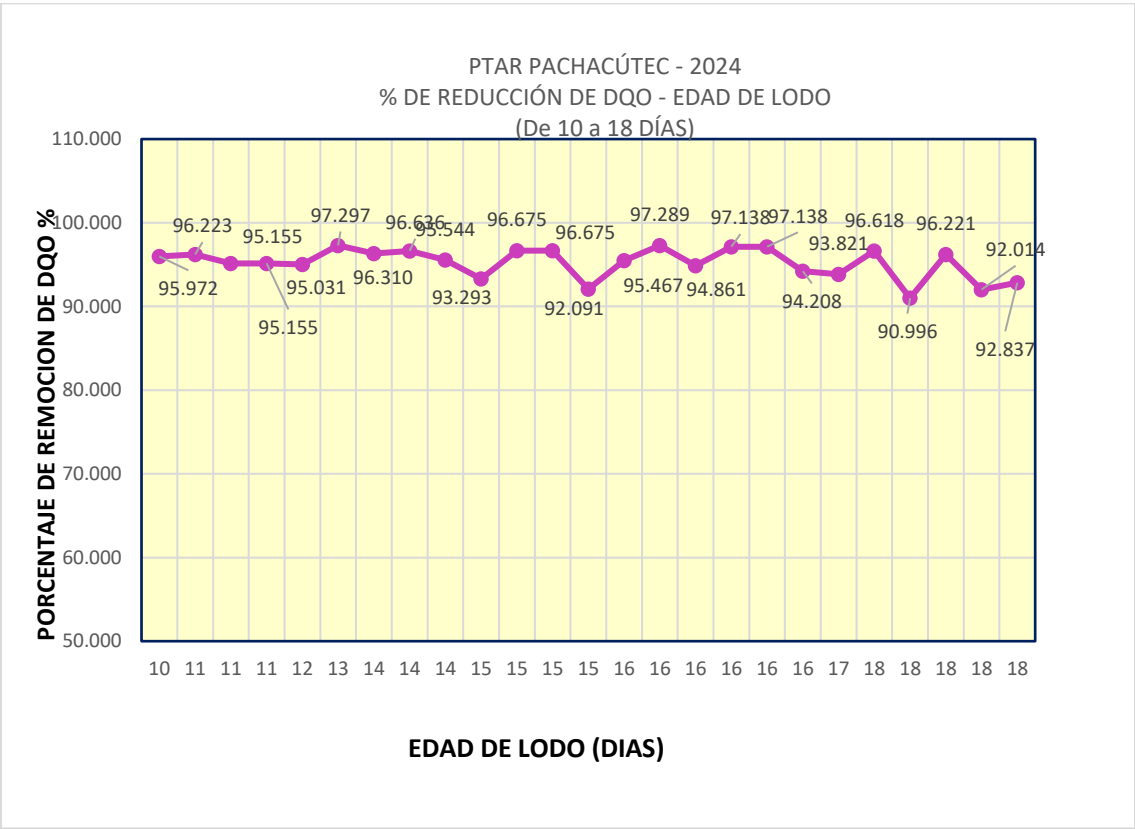


Figura 2. Porcentaje de remoción de DBO % (10 a 18 días)

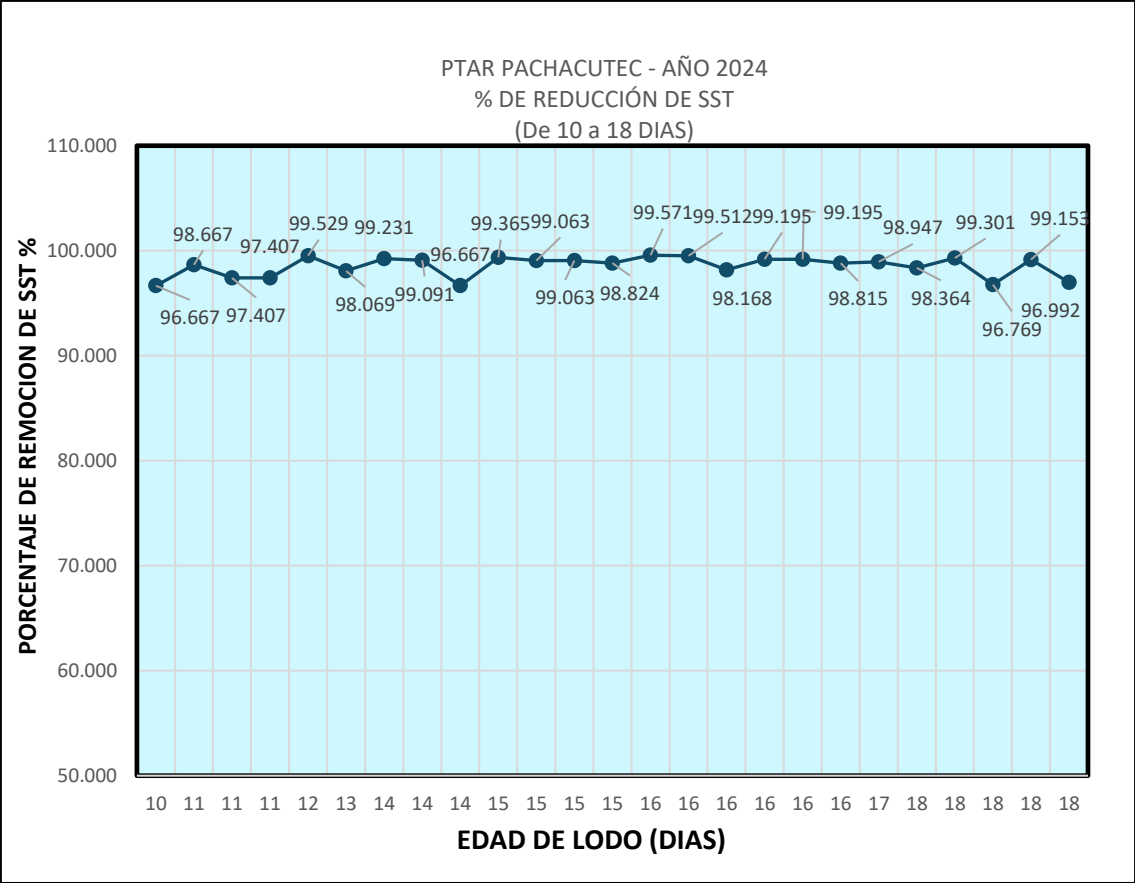


Figura 3. Porcentaje de remoción de DBO % (10 a 18 días)

Tabla 3. Resultados de la remoción de carga orgánica, medida en Demanda Bioquímica de Oxígeno y Demanda Química de Oxígeno, y de sólidos suspendidos totales, mediante la manipulación de la edad de lodos (19 a 22 días)

RESULTADOS DE LA REMOCIÓN DE CARGA ORGÁNICA MEDIDA EN DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO Y DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO Y SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES Y LA MANIPULACIÓN DE LA EDAD DE LODOS (19 a 22 días)

N°	Fecha	Edad de lodo	Caudal de Ingreso	DBO Ingreso	DQO Ingreso	SST Ingreso	volumen reactor 04 m3	SSVLM reactor 4 mg/L	Caudal de lodo dispuesto m3/día	ssv lodo salida mg/L	Reactor 04 Caudal tratado	ssv efluente	DQO efluente	SST efluente	DBO efluente	REDUCCIÓN DE DBO	% DE REDUCCIÓN DE DBO	REDUCCIÓN DE DQO	% DE REDUCCIÓN DE DQO	REDUCCIÓN DE SST	% DE REDUCCIÓN DE SST
1	19/08/2024	19	2,907.00	767.36	1199.00	505	12,149.00	1,637.36	480.00	2,135.60	3,857.00	3.80	29.00	5.00	15.95	751.41	97.921	1170.00	97.581	500.00	99.010
2	11/01/2025	19	4,724.00	730.88	1142.00	600	12,149.00	2,610.00	581.00	2,789.20	4,274.00	2.28	38.00	3.00	20.9	709.98	97.140	1104.00	96.673	597.00	99.500
3	22/08/2024	19	2,484.67	596.48	932.00	655	12,149.00	1,761.52	336.00	3,222.40	3,702.50	4.56	29.00	6.00	15.95	580.53	97.326	903.00	96.888	649.00	99.084
4	24/09/2024	19	2,667.00	810.24	1266.00	650	12,149.00	1,885.68	481.00	2,371.20	3,814.50	9.12	42.00	12.00	23.1	787.14	97.149	1224.00	96.682	638.00	98.154
5	20/08/2024	20	2,751.67	776.96	1214.00	530	12,149.00	1,652.88	238.00	4,225.60	3,789.00	2.28	34.00	3.00	18.7	758.26	97.593	1180.00	97.199	527.00	99.434
6	13/08/2024	20	2,577.67	715.52	1118.00	580	12,149.00	1,552.00	482.00	1,915.20	3,627.50	3.04	29.00	4.00	15.95	699.57	97.771	1089.00	97.406	576.00	99.310
7	14/08/2024	20	2,659.67	871.68	1362.00	625	12,149.00	2,079.68	350.00	3,526.40	3,667.50	3.04	29.00	4.00	15.95	855.73	98.170	1333.00	97.871	621.00	99.360
8	21/08/2024	20	2,569.00	853.12	1333.00	610	12,149.00	1,559.76	260.00	3,465.60	3,516.00	8.36	35.00	11.00	19.25	833.87	97.744	1298.00	97.374	599.00	98.197
9	4/09/2024	20	2,754.67	746.24	1166.00	545	12,149.00	1,908.96	360.00	3,100.80	3,696.50	5.32	50.00	7.00	27.5	718.74	96.315	1116.00	95.712	538.00	98.716
10	10/09/2024	21	2,818.00	789.12	1233.00	635	12,149.00	2,071.92	251.00	4,772.80	3,798.50	7.60	56.00	10.00	30.8	758.32	96.097	1177.00	95.458	625.00	98.425
11	8/01/2025	21	4,409.50	739.84	1156.00	675	12,149.00	2,720.00	290.00	5,510.00	4,020.00	2.28	51.00	3.00	28.05	711.79	96.209	1105.00	95.588	672.00	99.556
12	23/09/2024	21	2,744.33	849.92	1328.00	530	12,149.00	2,033.12	511.00	2,264.80	4,102.50	10.64	53.00	14.00	29.15	820.77	96.570	1275.00	96.009	516.00	97.358
13	11/09/2024	21	2,729.67	816.64	1276.00	690	12,149.00	1,707.20	266.00	3,731.60	3,456.50	4.56	49.00	6.00	26.95	789.69	96.700	1227.00	96.160	684.00	99.130
14	27/08/2024	21	2,460.33	636.16	994.00	465	12,149.00	1,761.52	382.00	2,644.80	3,305.50	4.56	40.00	6.00	22	614.16	96.542	954.00	95.976	459.00	98.710
15	25/09/2024	21	2,688.33	877.44	1371.00	550	12,149.00	2,095.20	436.00	2,728.40	2,859.50	8.36	31.00	11.00	17.05	860.39	98.057	1340.00	97.739	539.00	98.000
16	18/09/2024	21	2,749.33	577.92	903.00	635	12,149.00	1,691.68	540.00	1,763.20	3,529.00	7.60	44.00	10.00	24.2	553.72	95.813	859.00	95.127	625.00	98.425
17	7/01/2025	21	4,412.00	764.80	1195.00	640	12,149.00	2,824.00	390.00	4,157.20	4,189.00	3.04	55.00	4.00	30.25	734.55	96.045	1140.00	95.397	636.00	99.375
18	28/08/2024	21	2,546.67	834.56	1304.00	800	12,149.00	1,489.92	470.00	1,793.60	3,332.50	5.32	51.00	7.00	28.05	806.51	96.639	1253.00	96.089	793.00	99.125
19	28/09/2024	21	3,000.00	794.88	1242.00	670	12,149.00	1,862.40	401.00	2,348.40	4,094.00	29.64	51.00	39.00	28.05	766.83	96.471	1191.00	95.894	631.00	94.179
20	21/09/2024	22	3,162.67	840.96	1314.00	730	12,149.00	1,280.40	382.00	1,748.00	4,184.50	12.92	49.00	17.00	26.95	814.01	96.795	1265.00	96.271	713.00	97.671
21	4/01/2025	22	4,918.50	723.20	1130.00	545	12,149.00	2,930.00	368.00	4,446.00	4,566.50	3.04	38.00	4.00	20.9	702.30	97.110	1092.00	96.637	541.00	99.266
22	3/10/2024	22	2,882.00	752.00	1175.00	540	12,149.00	1,668.40	473.00	1,869.60	3,130.50	17.48	54.00	23.00	29.7	722.30	96.051	1121.00	95.404	517.00	95.741
23	14/09/2024	22	3,073.33	641.92	1003.00	505	12,149.00	1,808.08	401.00	2,485.20	4,290.00	4.56	42.00	6.00	23.1	618.82	96.401	961.00	95.813	499.00	98.812
24	2/01/2025	22	8,966.50	635.52	993.00	440	12,149.00	3,030.00	476.00	3,480.80	8,278.50	5.32	33.00	7.00	18.15	617.37	97.144	960.00	96.677	433.00	98.409
25	10/10/2024	22	2,785.00	605.44	946.00	590	12,149.00	1,707.20	420.00	2,158.40	3,623.50	11.40	41.00	15.00	22.55	582.89	96.275	905.00	95.666	575.00	97.458
																	96.882		96.372		98.416

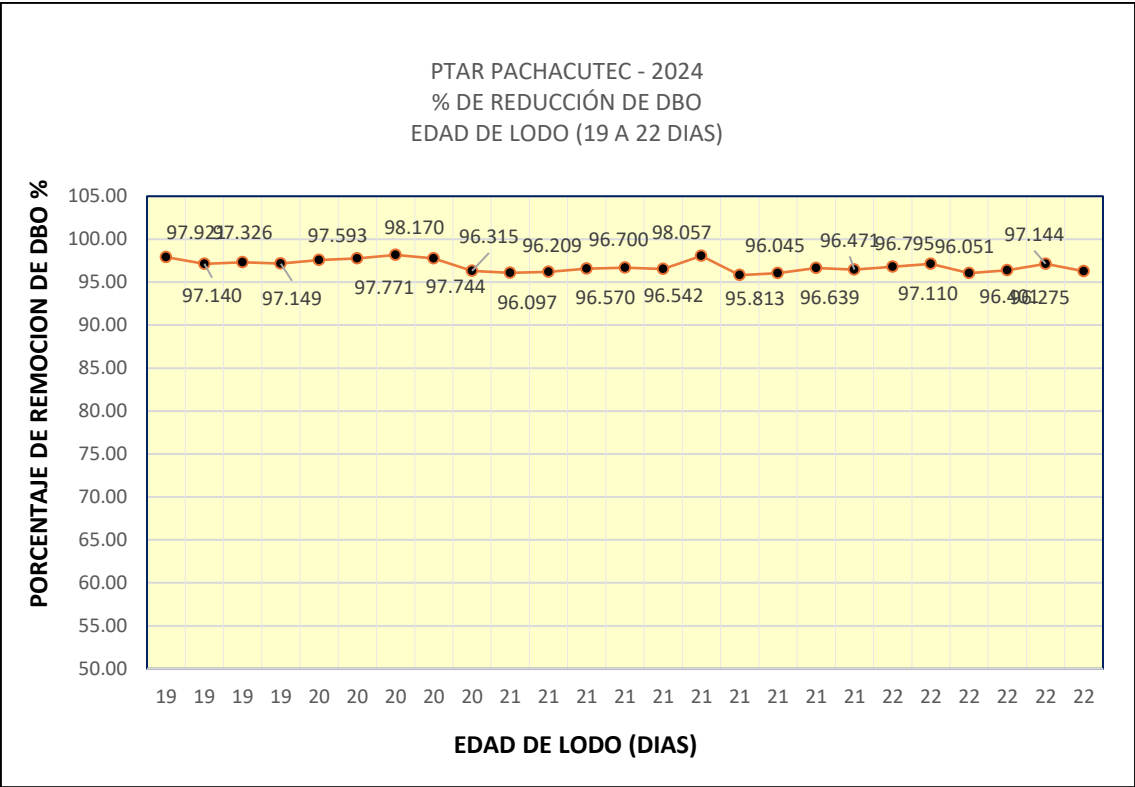


Figura 4. Porcentaje de remoción de DBO % (19 a 22 días)

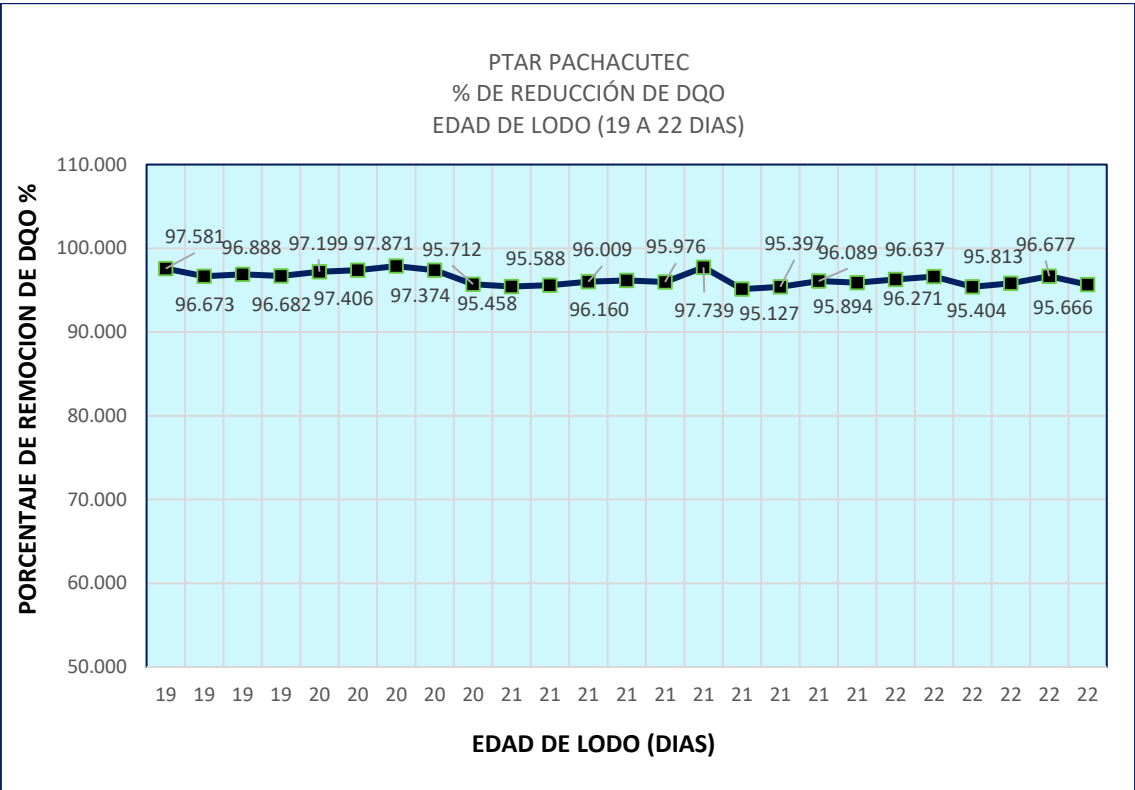


Figura 5. Porcentaje de remoción de DQO % (19 a 22 días)

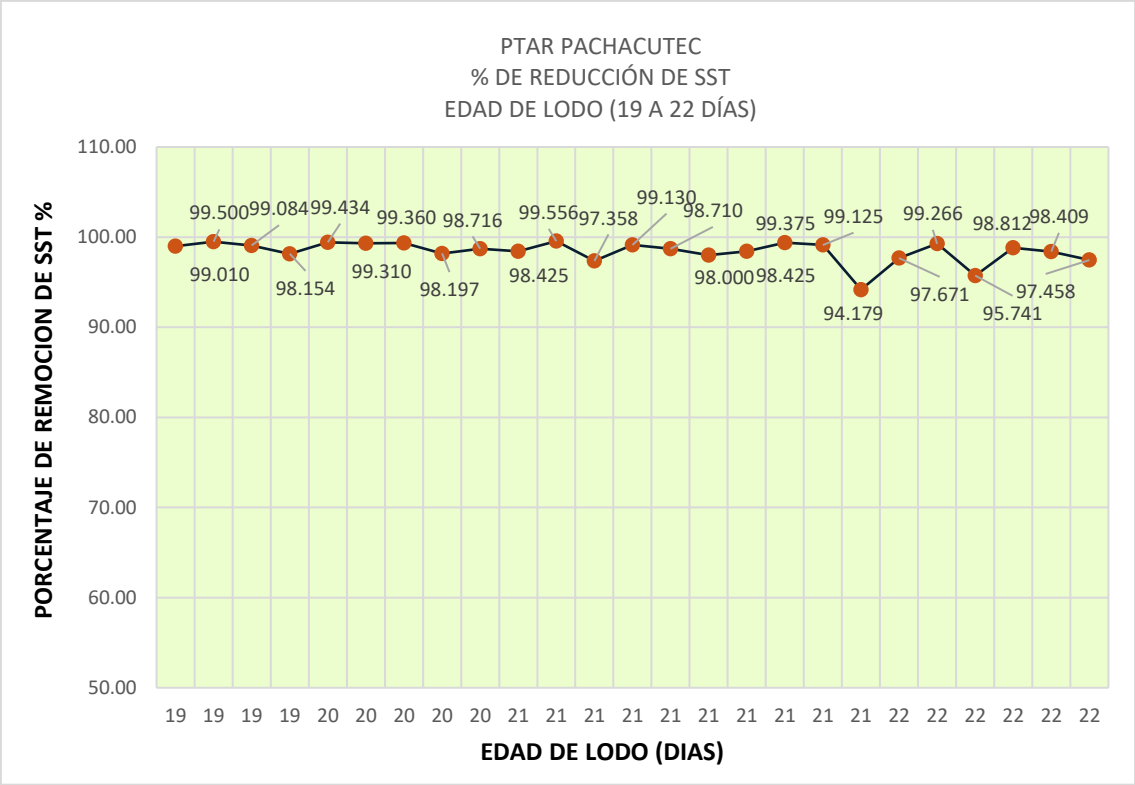


Figura 6. Porcentaje de remoción de SST % (19 a 22 días)

Tabla 4. Resultados de la remoción de carga orgánica, medida en Demanda Bioquímica de Oxígeno, Demanda Química de Oxígeno y Sólidos Suspendidos Totales, mediante la manipulación de la edad de lodos (23 a 33 días)

RESULTADOS DE LA REMOCIÓN DE CARGA ORGÁNICA MEDIDA EN DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO Y DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO Y SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES Y LA MANIPULACIÓN DE LA EDAD DE LODOS (23 a 33 días)

N°	Fecha	Edad de lodo	Caudal de Ingreso	DBO Ingreso	DQO Ingreso	SST Ingreso	volumen reactor 04 m3	SSVLM reactor 4 mg/L	Caudal de lodo dispuesto R4 m3/día	ssv lodo salida mg/L	Reactor 04 Caudal tratado	SSV efluente	DQO efluente	SST efluente	DBO efluente	REDUCCIÓN DE DBO	% DE REDUCCIÓN DE DBO	REDUCCIÓN DE DQO	% DE REDUCCIÓN DE DQO	REDUCCIÓN DE SST	% DE REDUCCIÓN DE SST
1	26/11/2024	22.91	4,199.00	673.28	1052.00	690	12,149.00	2,200.00	334.00	3,450.40	3,787.00	3.80	68.00	5.00	37.4	635.88	94.445	984.00	93.536	685.00	99.275
2	4/12/2024	23.10	4,212.00	710.40	1110.00	990	12,149.00	2,550.00	182.00	7,337.80	3,802.00	1.52	72.00	2.00	39.6	670.80	94.426	1038.00	93.514	988.00	99.798
3	4/10/2024	23.15	2,774.67	846.72	1323.00	795	12,149.00	1,637.36	285.00	2,812.00	3,616.50	15.96	59.00	21.00	32.45	814.27	96.168	1264.00	95.540	774.00	97.358
4	2/10/2024	23.17	2,624.33	951.04	1486.00	710	12,149.00	1,660.64	372.00	2,188.80	2,975.50	19.00	60.00	25.00	33	918.04	96.530	1426.00	95.962	685.00	96.479
5	13/11/2024	23.32	4,802.00	355.84	556.00	630	12,149.00	2,860.00	420.00	3,480.80	3,664.50	7.60	31.00	10.00	28.6	327.24	91.963	525.00	94.424	620.00	98.413
6	22/11/2024	23.48	4,527.00	901.76	1409.00	685	12,149.00	2,280.00	416.00	2,736.00	3,902.00	10.64	58.00	14.00	31.9	869.86	96.462	1351.00	95.884	671.00	97.956
7	12/12/2024	24.14	4,267.50	576.64	901.00	655	12,149.00	2,410.00	418.00	2,888.00	3,864.50	1.52	62.00	2.00	34.1	542.54	94.086	839.00	93.119	653.00	99.695
8	28/11/2024	24.36	4,177.00	727.68	1137.00	755	12,149.00	2,420.00	361.00	3,321.20	3,547.50	2.28	97.00	3.00	53.35	674.33	92.668	1040.00	91.469	752.00	99.603
9	6/12/2024	24.39	4,205.00	557.44	871.00	760	12,149.00	2,510.00	316.00	3,853.20	3,914.00	8.36	53.00	11.00	29.15	528.29	94.771	818.00	93.915	749.00	98.553
10	29/11/2024	24.47	4,115.00	683.52	1068.00	450	12,149.00	2,960.00	304.00	4,803.20	4,085.00	2.28	70.00	3.00	38.5	645.02	94.367	998.00	93.446	447.00	99.333
11	26/12/2024	24.74	4,714.00	401.92	628.00	590	12,149.00	3,070.00	375.00	3,974.80	4,424.00	3.80	31.00	5.00	17.05	384.87	95.758	597.00	95.064	585.00	99.153
12	23/11/2024	25.04	4,640.00	477.44	746.00	880	12,149.00	2,440.00	421.00	2,751.20	4,223.50	6.08	70.00	8.00	38.5	438.94	91.936	676.00	90.617	872.00	99.091
13	28/12/2024	25.15	4,814.00	384.64	601.00	265	12,149.00	2,430.00	325.00	3,534.00	4,743.50	5.32	50.00	7.00	27.5	357.14	92.850	551.00	91.681	258.00	97.358
14	11/12/2024	25.17	4,109.50	585.60	915.00	790	12,149.00	2,620.00	368.00	3,412.40	3,819.50	2.28	73.00	3.00	40.15	545.45	93.144	842.00	92.022	787.00	99.620
15	10/12/2024	25.37	4,323.50	563.84	881.00	550	12,149.00	2,660.00	369.00	3,427.60	4,008.50	2.28	49.00	3.00	26.95	536.89	95.220	832.00	94.438	547.00	99.455
16	2/12/2024	25.55	4,221.00	858.88	1342.00	820	12,149.00	2,520.00	451.00	2,637.20	3,865.50	2.28	63.00	3.00	34.65	824.23	95.966	1279.00	95.306	817.00	99.634
17	14/10/2024	25.79	2,565.33	813.44	1271.00	590	12,149.00	1,777.04	310.00	2,599.20	3,450.50	9.12	66.00	12.00	36.3	777.14	95.537	1205.00	94.807	578.00	97.966
18	17/10/2024	26.09	2,692.67	675.84	1056.00	605	12,149.00	1,474.40	271.00	2,401.60	3,365.50	10.64	56.00	14.00	30.8	645.04	95.443	1000.00	94.697	591.00	97.686
19	16/11/2024	26.49	4,660.50	449.92	703.00	425	12,149.00	2,430.00	446.00	2,409.20	4,803.00	8.36	62.00	11.00	34.1	415.82	92.421	641.00	91.181	414.00	97.412
20	3/01/2025	27.51	13,736.00	812.16	1269.00	590	12,149.00	2,570.00	436.00	2,515.60	12,587.50	3.04	53.00	4.00	29.15	783.01	96.411	1216.00	95.823	586.00	99.322
21	15/08/2024	28.08	2,808.00	813.44	1271.00	430	12,149.00	1,714.96	404.00	1,801.00	3,753.50	3.80	54.00	5.00	29.7	783.74	96.349	1217.00	95.751	425.00	98.837
22	14/12/2024	29.99	4,664.50	341.76	534.00	385	12,149.00	2,690.00	373.00	2,895.60	4,292.50	2.28	43.00	3.00	23.65	318.11	93.080	491.00	91.948	382.00	99.221
23	31/08/2024	32.08	2,715.67	483.20	755.00	400	12,149.00	1,808.08	340.00	1,953.20	3,885.50	5.32	53.00	7.00	29.15	454.05	93.967	702.00	92.980	393.00	98.250
24	25/11/2024	33.02	4,465.50	653.44	1021.00	705	12,149.00	2,980.00	316.00	3,404.80	3,852.50	5.32	73.00	7.00	40.15	613.29	93.856	948.00	92.850	698.00	99.007
25	12/10/2024	71.08	3,033.33	474.24	741.00	465	12,149.00	1,427.84	146.00	1,398.40	4,373.00	9.12	35.00	12.00	19.25	454.99	95.941	706.00	95.277	453.00	97.419
																	94.551		93.810		98.636

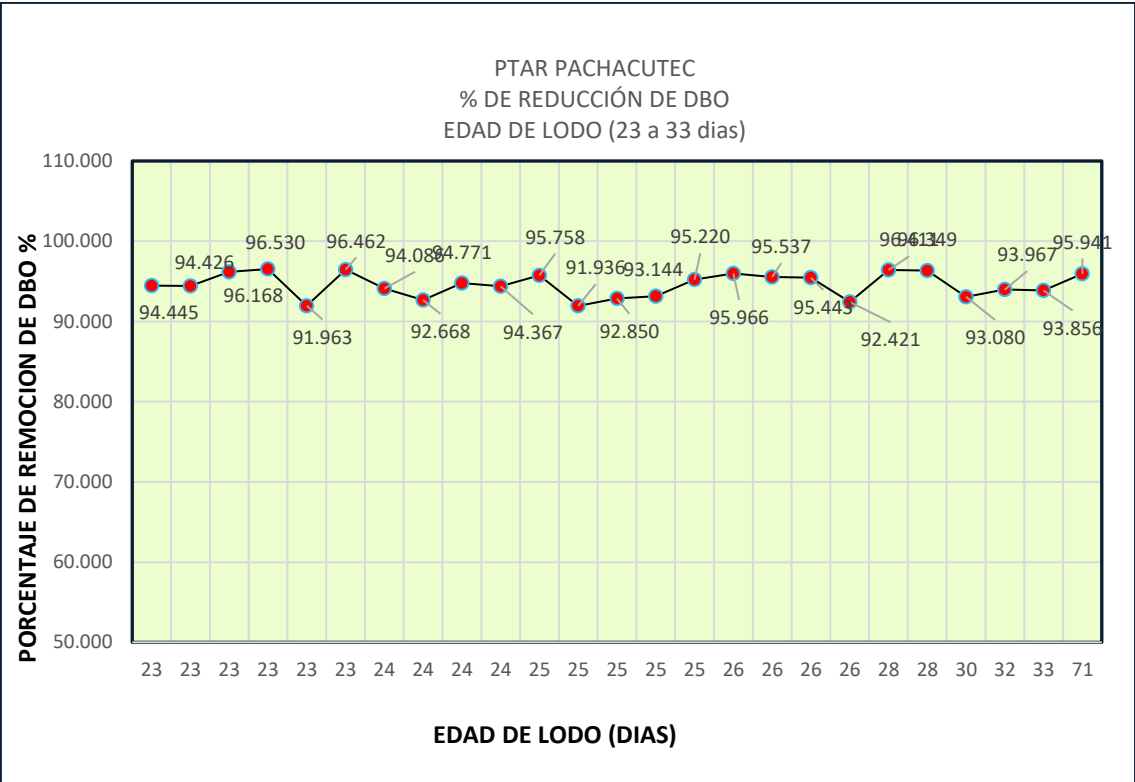


Figura 7. Porcentaje de remoción de DBO% (23 a 33 días)

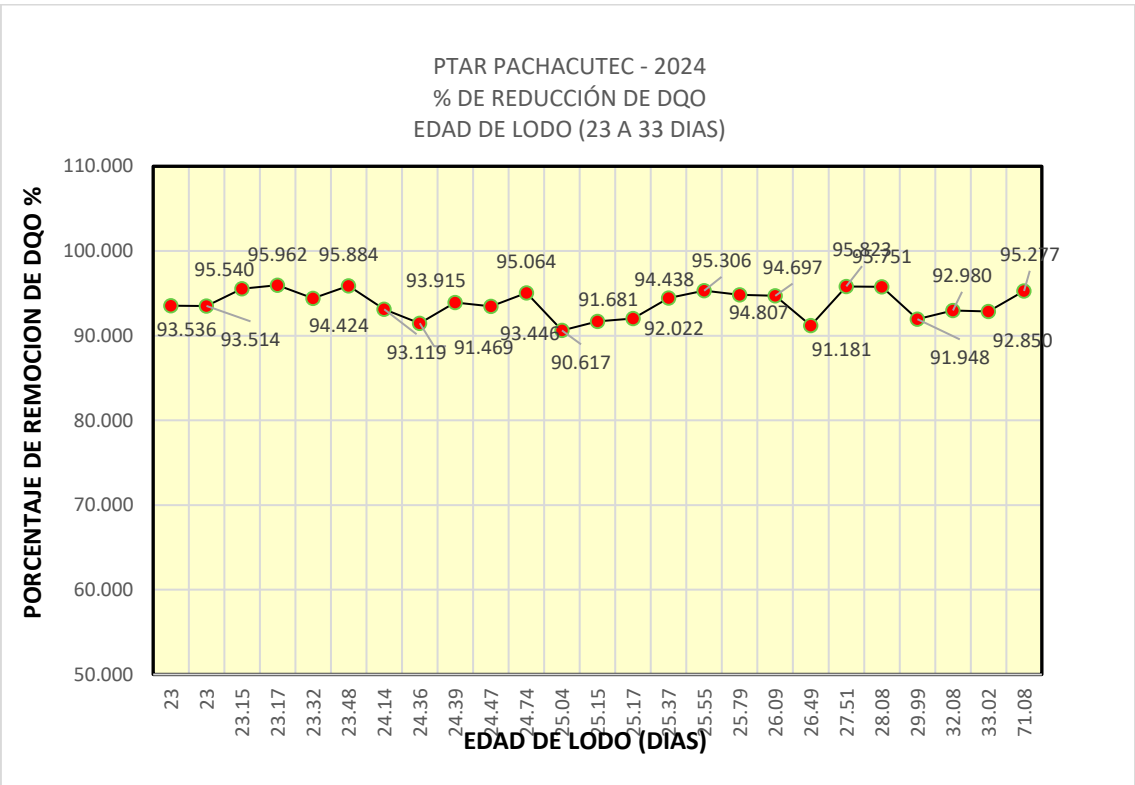


Figura 8. Porcentaje de remoción de DQO% (23 a 33 días)

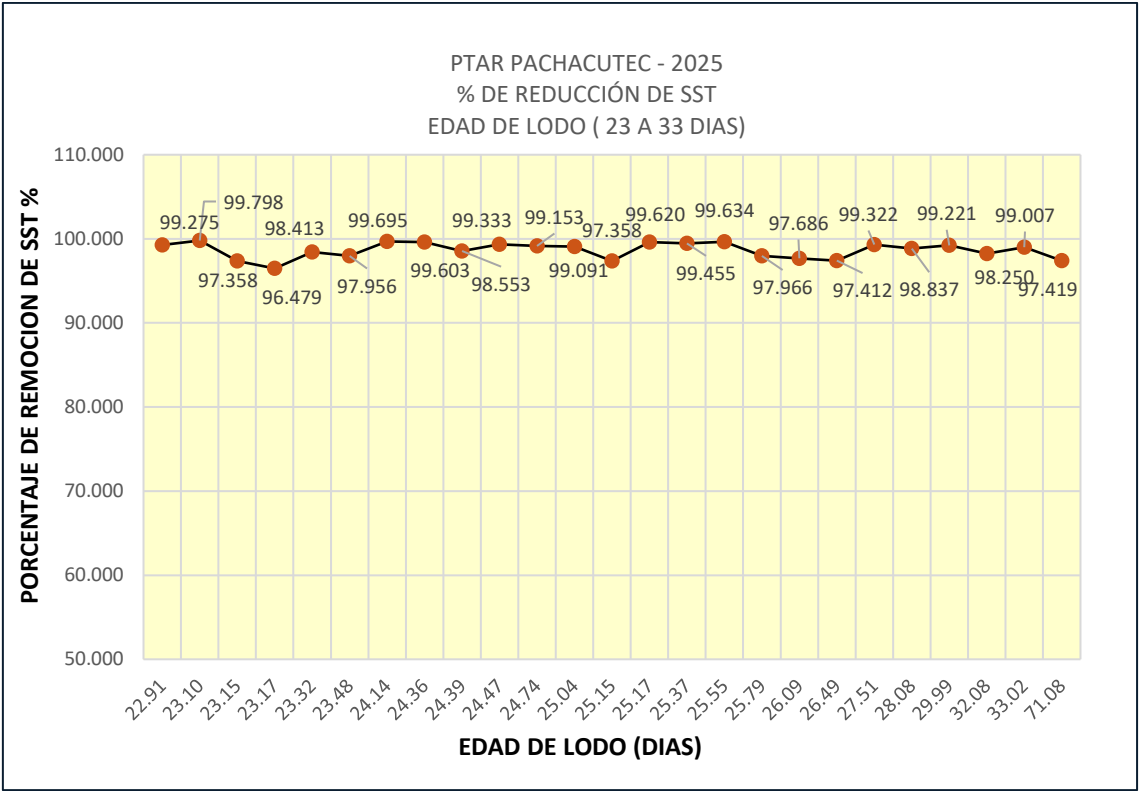


Figura 9. Porcentaje de remoción de SST% (23 a 33 días)

4. Discusión

Los resultados demostraron que existe una relación positiva, fuerte y estadísticamente significativa entre el incremento del tiempo de retención celular (edad del lodo) y la eficiencia de remoción de contaminantes como DBO₅, DQO y SST. Estas conclusiones confirman la hipótesis de investigación, respaldando el postulado de que el manejo optimizado de la edad del lodo incide de manera significativa en la calidad del efluente tratado. Desde el marco teórico, esta relación ha sido ampliamente documentada. Metcalf & Eddy (2016) sostienen que un SRT mayor permite estabilizar la biomasa, mejorando su capacidad para oxidar compuestos orgánicos y formar flóculos de mejor decantabilidad. Henze et al. (2019) complementan esta afirmación señalando que un SRT elevado promueve comunidades microbianas más eficientes en la degradación de materia orgánica persistente. Los resultados de esta tesis se alinean con dichas teorías.

Para el primer objetivo específico fue identificar la influencia del manejo de la edad de los lodos en la reducción de la carga orgánica. Los datos obtenidos muestran una remoción promedio de DBO₅ del 82.11% en la condición de mayor edad de lodo, frente a un 67.19% en la condición de menor edad. Esta diferencia fue estadísticamente significativa según la prueba de Kruskal-Wallis ($H = 50.48$, $p < 0.004$). Tales hallazgos coinciden con estudios como el de Duque-Sarango y Zagal-Andrade (2023), quienes modelaron el comportamiento de la remoción de DBO en reactores aeróbicos discontinuos y encontraron que mayores edades de lodo optimizan la eliminación de materia orgánica. Así mismo, Pulgar et al. (2021) evidenciaron que el control de la edad del lodo en RBCs permite mejorar la oxidación biológica. Estos resultados ratifican la efectividad de dicha estrategia operativa.

El segundo objetivo específico fue determinar la influencia del manejo de la edad de los lodos en la reducción de los sólidos suspendidos totales. En este caso, la remoción de DQO alcanzó el 74.10% en la condición de alta edad de lodo frente a 61.60% en la condición baja, con diferencias significativas ($H = 52.96$, $p < 0.011$). Esta tendencia de mejora también se correlaciona con los valores de SST registrados experimentalmente. Henze et al. (2019) afirman que un mayor SRT genera flóculos más densos y sedimentables, lo que favorece la clarificación secundaria y la reducción de SST. Estudios nacionales como el de Cantos et al. (2023) también han documentado que el ajuste en la gestión de lodos mejora significativamente la calidad del efluente en cuanto a turbidez y sólidos. Por lo tanto, los resultados obtenidos reafirman que la edad del lodo es un parámetro operativo clave para alcanzar efluentes que cumplan con la normativa.

El tercer objetivo fue identificar los parámetros operativos relacionados con la edad de los lodos que inciden en la eficiencia del tratamiento biológico. El análisis de correlación de Spearman reveló coeficientes de 0.922 para DBO₅ y 0.947 para DQO, ambos altamente significativos ($p < 0.001$), lo que indica una relación muy fuerte entre el aumento del SRT y la mejora en la remoción de contaminantes. Estos resultados concuerdan con los enfoques teóricos de Von Sperling (2007), quien plantea que el tiempo de retención celular incide directamente en la eficiencia metabólica del sistema. Adicionalmente, Enríquez-Nateros et al. (2021) demostraron en sistemas RAFA que la manipulación de la edad del lodo mejora el rendimiento de descontaminación. El presente estudio aporta evidencia empírica complementaria en un contexto de planta urbana costera (Callao), lo que refuerza la validez externa de tales modelos operativos.

Conclusión

El estudio demostró que el manejo optimizado de la edad de los lodos influye de manera significativa en la eficiencia de remoción de DBO₅, DQO y sólidos suspendidos totales en plantas de tratamiento con lodos activados y aireación extendida. A mayor tiempo de retención celular, se obtuvieron porcentajes de remoción superiores, con diferencias estadísticamente significativas entre condiciones operativas. En condiciones de alta edad del lodo (15 días) la remoción de DBO₅ superó el 82%, frente al 67% registrado con baja edad (5 días), mientras que la DQO y los SST

alcanzaron valores promedio mayores al 74%. El análisis de correlación mostró asociaciones muy fuertes entre la edad del lodo y la eficiencia de remoción ($r = 0.92$ para DBO₅ y $r = 0.95$ para DQO), confirmando que el tiempo de retención celular es un parámetro crítico para garantizar la calidad del efluente. Estos resultados aportan evidencia técnica y empírica para el diseño, evaluación y mejora de sistemas de tratamiento en contextos urbanos y costeros como el de Ventanilla, Callao.

Financiamiento

Ninguno.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Contribución de autores

Mimbela-Leon, J. D. C.: Definió y conceptualizó el tema de investigación, participó en el diseño metodológico, colaboró en la elaboración y aplicación de los instrumentos, y realizó la investigación. Además, elaboró el primer borrador del artículo científico y contribuyó a la revisión y edición final del documento.

Referencias bibliográficas

- American Public Health Association. (2022). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (24th ed.). APHA, AWWA, WEF.
- Cantos, M. F. P., Vélez, E. S., & Falcones, E. Z. (2023). Estabilización de fangos activos en planta de tratamiento mediante la técnica de compostaje bokashi. *Revista Científica y Tecnológica UPSE*, 10(2), 11-22. <https://doi.org/10.26423/rctu.v10i2.743>
- Duque-Sarango, P., & Zagal-Andrade, C. (2023). Modelamiento del tratamiento biológico: análisis con un ensayo experimental en un reactor discontinuo aeróbio. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 6(2), 1097-1107. <https://doi.org/10.34188/bjaerv6n2-012>
- Enríquez-Nateros, N. A., Cruz, R. M. Q. L., Herrera-Quispe, C. A., & Benavides, R. A. H. (2021). Descontaminación de aguas residuales utilizando reactores anaerobios de flujo ascendente. *Scientific Research Journal CIDI*, 1(2), 148-161. <https://doi.org/10.53942/srjcdi.v1i2.61>
- Henze, M., van Loosdrecht, M. C. M., Ekama, G. A., & Brdjanovic, D. (2019). *Biological wastewater treatment: Principles, modelling and design* (2nd ed.). IWA Publishing.
- Metcalf, & Eddy. (2016). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery* (5th ed.). McGraw-Hill Education.
- Pulgar, L. F. Q., MolanoGuarín, A. F., & Pramparo, L. (2021). Diseño hidráulico y evaluación a escala laboratorio de un sistema RBC (rotating biological contactor) para tanque primario de aguas residuales no domésticas provenientes de una industria de bebidas no alcohólicas. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 29(2), 324-333. <https://doi.org/10.4067/s0718-33052021000200324>