

# Optimización de la planta de tratamiento de aguas residuales de Sucre

López, N.<sup>a</sup>, Sejas, G.<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Lic. Ingeniero Civil de la facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia. Correo electrónico: nikyloppad29@gmail.com

<sup>b</sup> Lic. Ingeniero Civil, Maestrante/Egresado de la Maestría en Recursos Hídricos, Hidráulica e Ingeniería Sanitaria; Consultor en Supervisión de Proyectos en Saneamiento y Recursos Hídricos; Gestor de Programas y Proyectos Productivos y Sociales. Correo electrónico: gabbybbag@hotmail.com

## RESUMEN

La contaminación a causa de aguas residuales es un problema latente. A casi veinte años del funcionamiento de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Sucre, se hace necesario el mejoramiento para obtener un efluente menos contaminado. En el presente estudio se evalúa el estado del funcionamiento de la planta, plasmando e interpretando diferentes resultados de análisis laboratoriales de parámetros del agua residual con el objetivo de llegar a identificar las etapas que muestran una depuración menor a la esperada. Se concluye con la propuesta de la implementación de deflectores en las lagunas de sedimentación y maduración.

**Palabras clave:** planta de tratamiento de aguas residuales, análisis de parámetros del agua residual, deflectores en lagunas de maduración.

---

## ABSTRACT

Pollution due to wastewater is a latent problem. It's almost twenty years since Sucre's Wastewater Treatment Plant has started its operation, so improvement is necessary to obtain a less polluted effluent. In this study, the state of the plant's operation is evaluated, displaying and interpreting different results of laboratory analyzes of wastewater parameters in order to identify the phases that show less purification than expected. It concludes with the proposal of the implementation of baffles in the sedimentation and maturation lagoons.

**Keywords:** wastewater treatment plant, wastewater parameters analysis, baffles in maturation lagoons

## INTRODUCCIÓN

Se puede definir al agua residual como toda aquella agua que se desecha a través de las redes de alcantarillado sanitario que contiene aguas negras y aguas servidas. También incluye desechos de aguas industriales, mineras, etc.

El tratamiento de aguas residuales consiste en una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que tienen como fin eliminar los contaminantes presentes en el agua.

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Sucre (El Campanario) fue construida con el Proyecto Sucre II, y entró en funcionamiento el año 2003. Es una planta de tipo convencional y fue diseñada con un tiempo de vida útil de 30 años.

El cauce del Río Quirpinchaca fue, hasta antes de la construcción de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Sucre, receptor directo de las aguas residuales de la población de Sucre, con un alto nivel de contaminación, situación que con la construcción de la planta fue mejorando, sin embargo, a veinte años de su construcción la población aguas abajo manifiesta afectación por contaminación.

La comunidad de El Campanario, que es la primera comunidad que se encuentra aguas abajo de la planta, y también otras comunidades, se ven afectadas por la constante agresión ambiental provocada principalmente por la contaminación del río Quirpinchaca.

Ante ello, se ve la necesidad de encontrar la manera de mejorar la calidad del efluente de la Planta de Tratamiento de Agua Residual de Sucre proponiendo un proyecto de optimización de la planta, que, podría dar una solución pronta y temporal, garantizando un mejor funcionamiento para los años que quedan de su vida útil de diseño.

Con la realización de un estudio a profundidad de la planta se podrá identificar las unidades de tratamiento que desarrollen la depuración por debajo del rendimiento esperado, resultando un indicador que demande mejoras o modificaciones.

### PTAR DE SUCRE – “EL CAMPANARIO”

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Sucre se encuentra en la zona de la comunidad de El Campanario, a 8 km de la ciudad de Sucre, carretera entre Sucre y Potosí. La altitud promedio a la que se encuentra es 2630 m.s.n.m. y el área total utilizada es aproximadamente 11 ha.

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales es un sistema combinado de tratamiento convencional. Este sistema consta de las siguientes estructuras hidráulicas y sanitarias fundamentalmente:

- Pretratamiento: para retención de sólidos de gran tamaño se cuenta con la entrada y Bypass, rejas de desbaste (dos mecánicas y una manual), aforador Parshall y dos desarenadores que funcionan de forma alterna.
- Tratamiento Primario: para sedimentación y estabilización de lodos residuales, seis tanques Imhoff, seis tanques de regulación y cámaras de derivación de caudales con cuatro reguladores de caudal tipo ALPHEUS.
- Tratamiento Secundario: cuatro lechos percoladores, dos lagunas de sedimentación secundaria y dos lagunas de maduración para el tratamiento biológico y remoción de compuestos biodegradables.
- Tratamiento de Lodos: para el tratamiento de lodos la planta cuenta con aéreas de secado de lodos.

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Sucre no utiliza insumos químicos en el tratamiento de las aguas residuales.



Figura 1 PTAR de Sucre

## MATERIALES Y MÉTODOS

### EVALUACIÓN DEL ESTADO Y FUNCIONAMIENTO DE LA PTAR DE SUCRE

Se consideró que la forma más adecuada de realizar el diagnóstico, sería mediante una amplia recopilación y obtención de resultados de los análisis de las características del agua residual en cada etapa del tratamiento.

Además de contar con un registro de las últimas cuatro gestiones de la planta, se optó por complementar de manera experimental con asistencia diaria a la misma durante seis meses aproximadamente; este periodo benefició en la familiarización y el aprendizaje del funcionamiento completo de la planta y en general de PTARs,

del mismo modo todo el trabajo de laboratorio, llegando a realizar de forma específica y personal cada ensayo del agua residual.

Parámetros del agua evaluados en la PTAR

El laboratorio de la PTAR de Sucre, se encarga de evaluar las diferentes características físicas, químicas y biológicas del agua residual, comparando y tomando en cuenta los valores máximos establecidos en el RMCH (Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica).

En la siguiente tabla se especifica los parámetros que se analizan en la PTAR de Sucre y teniendo en cuenta que plasmar resultados de todos los ensayos que se realizan sería algo muy extenso, se optó por identificar e interpretar las características más importantes del agua residual (resaltados en la tabla).

Tabla 1 Parámetros de AR evaluados

PARÁMETRO	UNIDAD	Máx. acept.	Método de análisis
Caudal	l/seg	405,00	Medidor Parshall
DBO <sub>5</sub>	mgO <sub>2</sub> /L	80,00	BODTrakTM II
DQO	mgO <sub>2</sub> /L	250,00	Volumétrico
pH		6,0-9,0	pHmetro
Temperatura	°C		pHmetro
SST	mg/L	60,00	Gravimétrico
Coliformes Termoresistentes	NMP/100 ml	1.000	Tubos múltiples
Sólidos Sedimentables	mg/L	100,00	Gravimétrico
Sólidos Totales	mg/L	1.500	Gravimétrico
Sólidos Volátiles	%		Gravimétrico
Conductividad eléctrica	µS/cm		Conductímetro
Oxígeno Disuelto	mgO <sub>2</sub> /L	>50%	Medidor de OD
N-NH <sub>4</sub>	mgN/L		Colorímetro
Turbidez		<2.000	Colorímetro
Metales pesados			Colorímetro
Ensayos de metales pesados: fenoles, cianuro, fósforo, hierro, sulfuro, níquel, cromo, cobre, cadmio y plomo.			

Puntos de muestreo y análisis del agua residual de la PTAR

El muestreo de agua residual es el procedimiento por el cual se extrae una porción de agua representativa para la realización de los diferentes análisis de sus características.

El muestreo en la PTAR de Sucre se lo realiza de forma manual con recipientes de metal para el llenado de los bidones, tomando en cuenta las medidas de seguridad

que esto requiere. Las muestras son almacenadas en bidones de plástico de 5 litros de capacidad debidamente identificadas con un código del punto de muestreo en una etiqueta. Finalmente, cada muestra se conserva a menos de 10 °C.

En la figura 2 se puede apreciar un esquema donde se identifican los puntos o lugares de muestreo, en la tabla 2 se detalla y explica la ubicación de los puntos de muestreo.

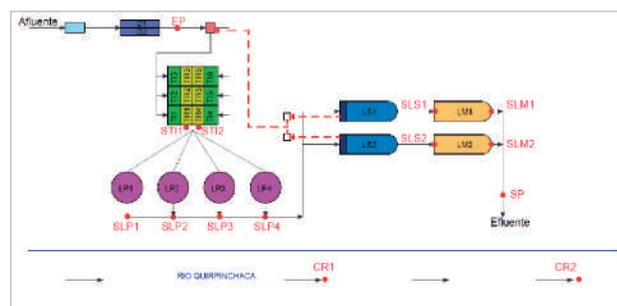


Figura 2 Esquema Puntos de Muestreo PTAR de Sucre

Tabla 2 Detalle Puntos de Muestreo PTAR de Sucre

Puntos de muestreo		
CÓDIGO	NOMBRE	UBICACIÓN
EP	Entrada de Planta	Después de desarenadores
ST11	Salida Tanques Imhoff 1	Cámara ALPHEUS 1
ST12	Salida Tanques Imhoff 2	Cámara ALPHEUS 2
SLP1	Salida Lecho Percolador 1	Canal de salida del LP1
SLP2	Salida Lecho Percolador 2	Canal de salida del LP2
SLP3	Salida Lecho Percolador 3	Canal de salida del LP3
SLP4	Salida Lecho Percolador 4	Canal de salida del LP4
SLS1	Salida Laguna de Sedimentación 1	Chorro de entrada a LM1
SLS2	Salida Laguna de Sedimentación 2	Chorro de entrada a LM2
SLM1	Salida Laguna de Maduración 1	Vertedor LM1
SLM2	Salida Laguna de Maduración 2	Vertedor LM2
SP	Salida de Planta	Canal de salida del AR tratada
CR1	Cuenca Receptora 1	50 m aguas arriba de SP (Río)
CR2	Cuenca Receptora 2	500 m aguas abajo de SP (Río)

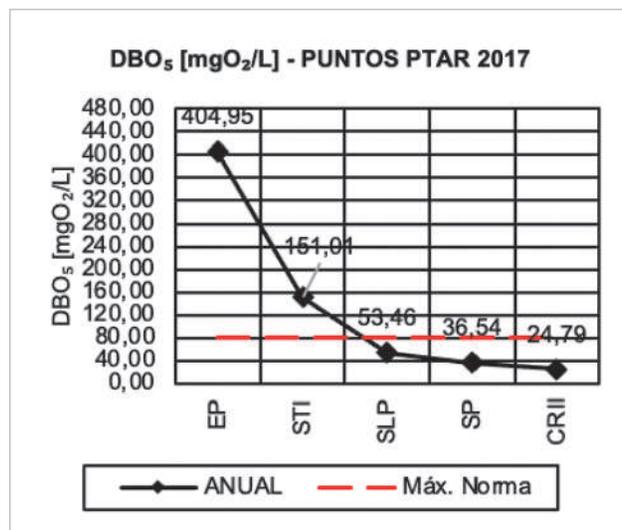
Datos del periodo 2017 – 2020 de la PTAR de Sucre

Se obtuvo datos semanales de los ensayos de la PTAR, desde la gestión 2017 hasta la gestión 2020, consideran-

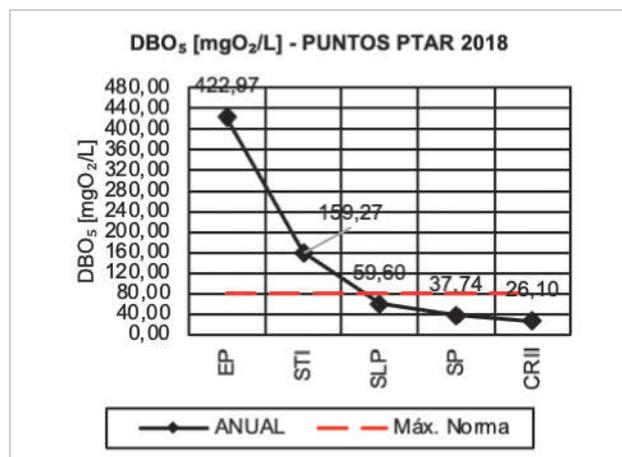
do que los cuatro últimos años de funcionamiento de la planta, son un periodo razonable para comparar y sintetizar datos.

Se debe aclarar que, durante el periodo de septiembre a noviembre de la gestión 2020, la planta estaba trabajando sin los lechos percoladores debido a falta de mantenimiento.

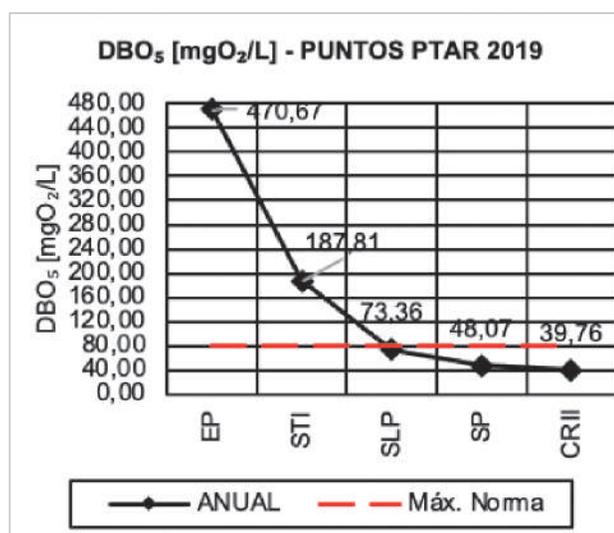
- **Demanda Bioquímica de Oxígeno al quinto día (DBO<sub>5</sub>):** Las gráficas exponen el valor de DBO<sub>5</sub> (promedio anual) en diferentes puntos de la planta; se puede observar, que en general, los valores de entrada están por encima de 400 mgO<sub>2</sub>/L, también que la mayor disminución se da en el tratamiento de los tanques Imhoff y de los lechos percoladores. A su vez, se podría concluir que, la planta cumple con la norma en cuanto al efluente, y que con el transcurso del cauce receptor aguas abajo, este valor va disminuyendo gradualmente.



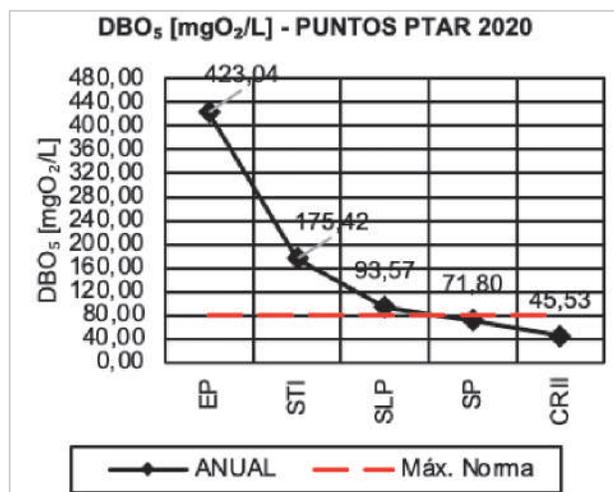
Gráfica 1 DBO<sub>5</sub> vs etapas de tto. (2017)



Gráfica 2 DBO<sub>5</sub> vs etapas de tto. (2018)

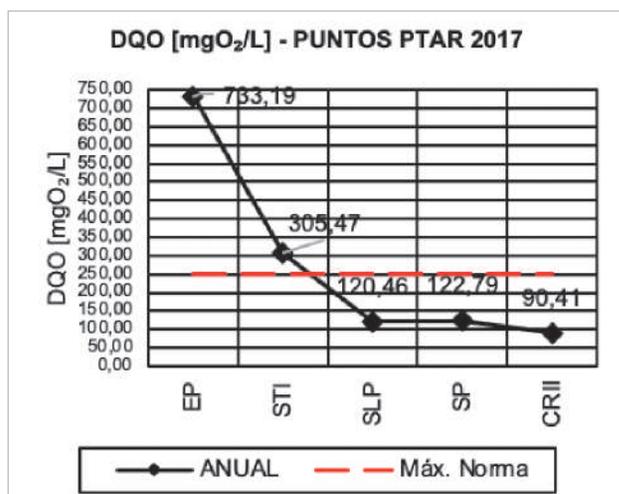


Gráfica 3 DBO<sub>5</sub> vs etapas de tto. (2019)

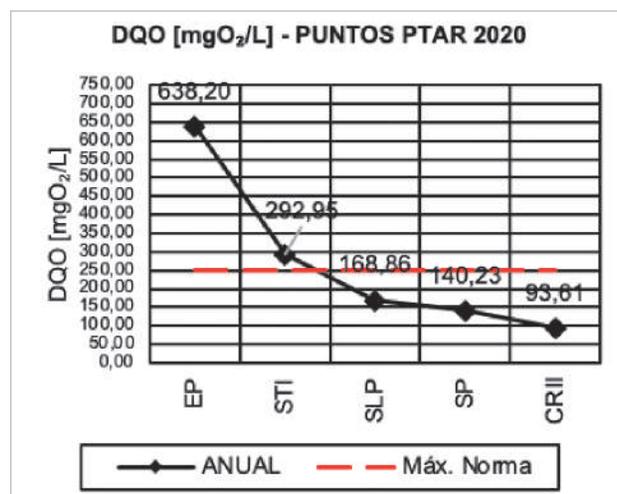


Gráfica 4 DBO<sub>5</sub> vs etapas de tto. (2020)

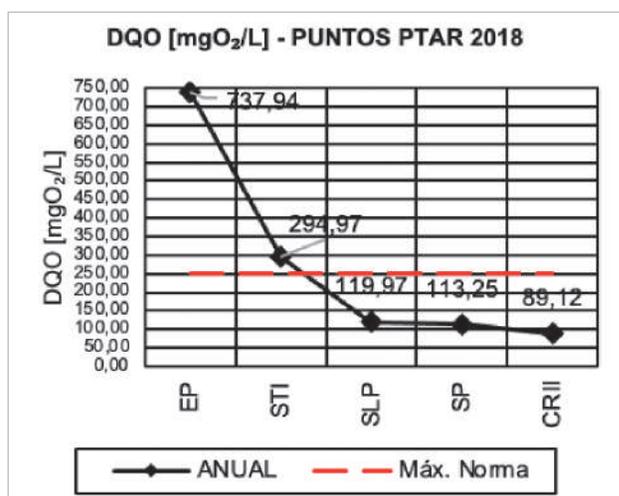
- **Demanda Química de Oxígeno (DQO):** Las gráficas muestran los valores promedios anuales de DQO a la salida de cada etapa de tratamiento, pudiendo identificarse la forma en la que éstos van descendiendo a través del tratamiento que reciben. Comparando los valores en las diferentes etapas de tratamiento, las variaciones son mínimas entre cada año. Los valores de entrada a la planta están entre 630 y 750 mgO<sub>2</sub>/L, y los valores del efluente de la planta son menores a 150 mgO<sub>2</sub>/L (máximo valor por norma 250 mgO<sub>2</sub>/L).



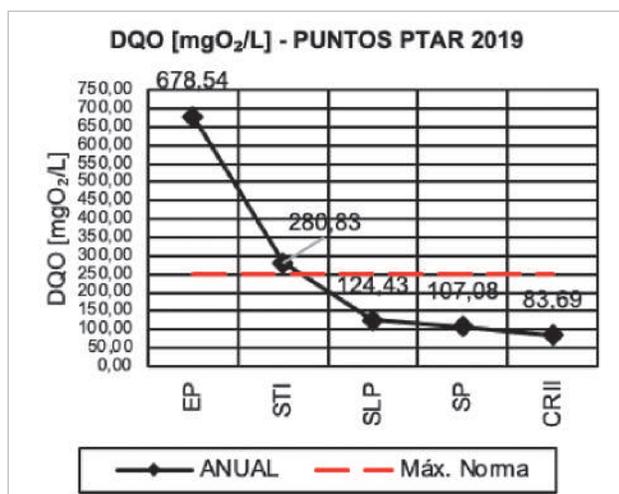
Gráfica 5 DQO vs etapas de tto. (2017)



Gráfica 8 DQO vs etapas de tto. (2020)



Gráfica 6 DQO vs etapas de tto. (2018)

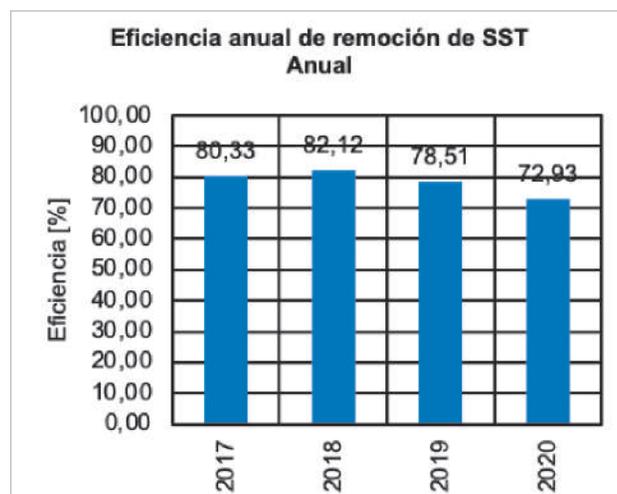


Gráfica 7 DQO vs etapas de tto. (2019)

- **Sólidos suspendidos totales (SST):** A causa de la falta de análisis de SST en los diferentes puntos de tratamiento de la planta, sólo se puede realizar una interpretación anual y general; se observa, en la gráfica, que la eficiencia de remoción de SST está por encima del 70%, sin embargo, no es suficiente para que los valores del efluente cumplan con la norma.

Tabla 3 SST gestiones 2017 - 2020

AÑO	SST [mg/L]			
	EP	SP	CRI	CRII
2017	399,68	77,08	75,00	68,75
2018	424,90	75,08	67,51	73,76
2019	406,26	86,57	85,75	98,58
2020	363,30	98,57	88,48	75,15
Máx		60,00	60,00	60,00

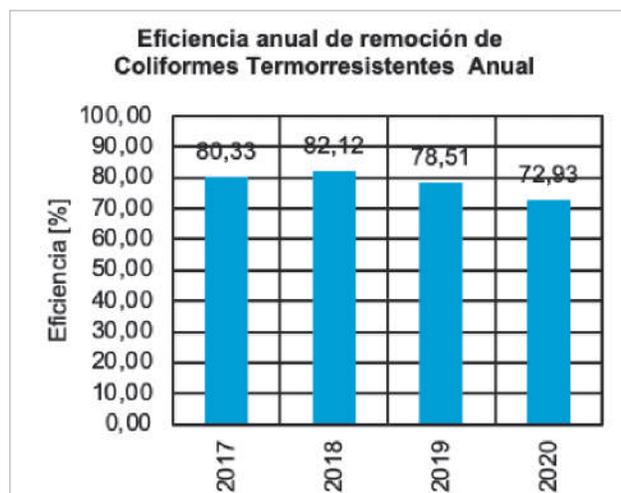


Gráfica 9 Eficiencias de remoción SST

- **Coliformes Termorresistentes:** Los valores de los coliformes termorresistentes son demasiado elevados, y están lejos de cumplir con lo establecido en la norma, como se puede apreciar en la tabla. Por otro lado, cabe resaltar la alta eficiencia de remoción de coliformes termorresistentes de la planta en conjunto.

Tabla 4 Coliformes termorresistentes anual

Coliformes Termorresistentes			
AÑO	EP [NMP/100ml]	SP [NMP/100ml]	Eficiencia [%]
2017	9,60E+07	4,81E+06	85,29
2018	5,26E+07	8,11E+06	80,24
2019	4,75E+08	1,81E+07	91,76
2020	5,38E+07	4,56E+06	86,36
<b>Máx</b>		1,00E+03	

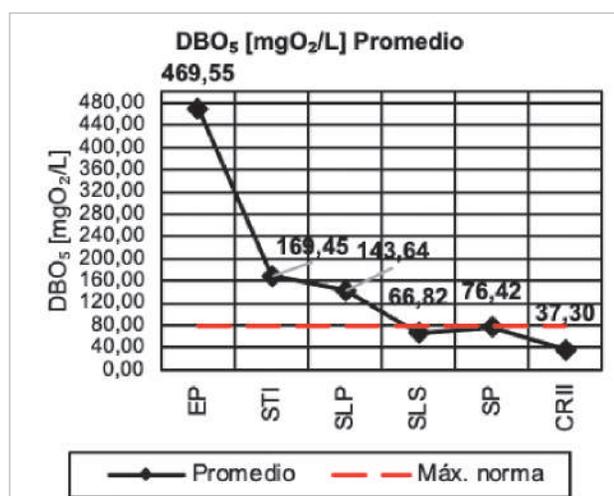


Gráfica 10 Eficiencias de remoción

Datos del periodo de recolección de información in situ

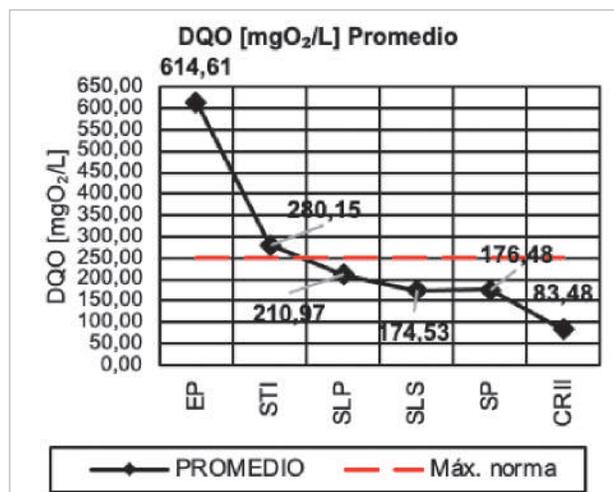
Como se pudo observar en los gráficos de las gestiones pasadas de la planta, no se lleva un registro a la salida de cada etapa de tratamiento, la complementación de análisis en esos puntos faltantes se los llegó a realizar durante los meses en los que se hizo visitas a la planta.

- **Demanda Bioquímica de Oxígeno al quinto día (DBO<sub>5</sub>):** En la gráfica se puede resaltar la baja remoción de los lechos percoladores, teniendo en cuenta que no estuvieron en funcionamiento durante casi cuatro meses, es importante comparar con los valores previos, remarcando que cuando los lechos percoladores funcionan, la remoción tiende a ser muy alta.



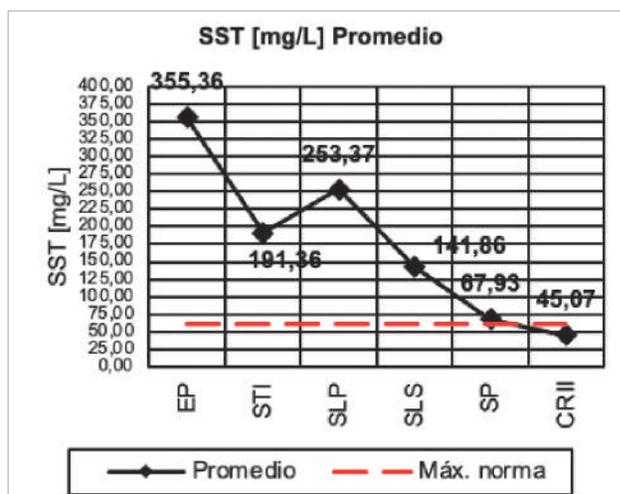
Gráfica 11 DBO<sub>5</sub> vs etapas de tratamiento

- **Demanda Química de Oxígeno (DQO):** En la gráfica se puede resaltar que el valor a la salida de las lagunas de sedimentación es menor en relación al obtenido en la salida de la planta, esto supondría una degradación en la calidad del agua al pasar por las lagunas de maduración.



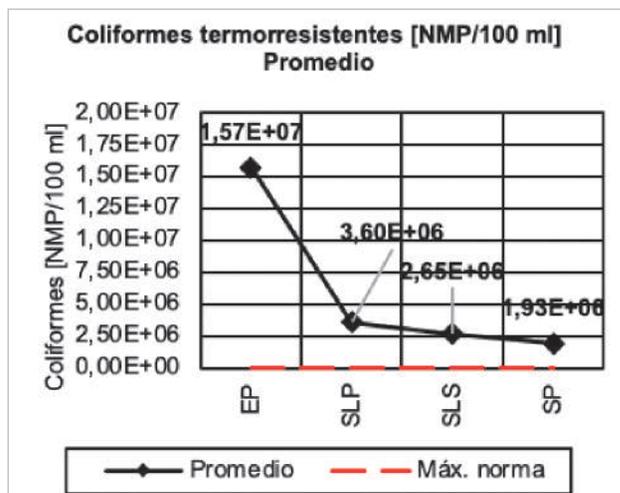
Gráfica 12 DQO vs etapas de tratamiento

- **Sólidos suspendidos totales (SST):** En la gráfica es importante resaltar que a la salida de los lechos percoladores tiende a aumentar el valor, esto se debe al desprendimiento de la biopelícula, remarcando la importancia de la zona de sedimentación en las lagunas de sedimentación. En el análisis de las cuatro gestiones anteriores se pudo observar que los SST son un parámetro difícil de cumplir; con los resultados in situ, se aprecia que si se encuentran cerca del valor máximo de la norma.



Gráfica 13 SST vs etapas de tratamiento

- **Coliformes Termorresistentes:** en la gráfica se puede observar que hasta la salida de los lechos, generalmente, existe una remoción de coliformes; en cambio en las lagunas de sedimentación, la remoción es poca o nula, y en las lagunas de maduración si se da remoción, pero no de forma tan eficiente como debería de ser.



Gráfica 14 Coliformes vs etapas de tratamiento

Conclusiones de la evaluación del estado de la PTAR de Sucre

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Sucre trabaja bajo altas eficiencia de rendimiento general, sobre todo es de resaltar el rendimiento de la etapa de tratamiento primario.

Los valores de DBO<sub>5</sub> y DQO a la salida de la planta si son más bajos que los máximos del RMCH; por lo que en realidad pueden considerarse valores que no se necesitan optimizar de forma inmediata.

Los sólidos suspendidos totales son un parámetro con resultados elevados en la PTAR, la eficiencia de remoción en el tratamiento primario es aproximadamente del 45%, en las lagunas de sedimentación, la remoción es similar a la del tratamiento primario, con aproximadamente 44%. Estos sólidos sólo tienden a tener una mejor remoción con un asentamiento químico (floculadores), pero la PTAR de Sucre, al intentar ser amigable con el ambiente y evitar costos elevados de tratamiento, no cuenta, ni podrá contar con una etapa de tratamiento químico para los sólidos suspendidos.

Los coliformes termorresistentes o coliformes fecales son el parámetro de tratamiento más débil de la planta, a pesar de tener eficiencias de remoción altas, los valores están lejos de llegar a cumplir con la norma.

### RESULTADOS

Habiendo realizado una interpretación amplia de los resultados de la PTAR de Sucre, y con las conclusiones deducidas, se definió que una manera razonable de optimizar la planta sería buscando la forma de mejorar las lagunas de sedimentación y maduración (tratamiento de coliformes termorresistentes), dejando de lado la opción de ampliarlas.

### DEFLECTORES EN LAGUNAS DE SEDIMENTACIÓN Y MADURACIÓN

Los deflectores, pantallas o mamparas en las lagunas de las PTARs, son estructuras de partición que al subdividir las lagunas logran incrementar el tiempo de retención del agua y crear un flujo con mayor eficiencia, dado que una laguna sin deflectores tiene un flujo de agua tipo disperso, y con implementación de las mismas cambia a un flujo tipo pistón.

El método empleado para el diseño de lagunas de sedimentación y de maduración con deflectores es el de "Flujo Disperso" (Método de Yánez). Este método consiste en el cálculo de la remoción de coliformes termorresistentes y DBO<sub>5</sub> en el efluente de la laguna. Como las dimensiones y el tiempo de retención de las lagunas de la PTAR de Sucre no pueden cambiarse, el enfoque será calcular la remoción de coliformes termorresistentes y DBO<sub>5</sub> con la implementación de deflectores.

Tabla 5 Ecuaciones empleadas Método de Yánez

Parámetro de cálculo		Unidad	Ecuación	
a	Tiempo de retención hidráulico	O	días	$O_s = \frac{V}{Q_i}$
b	Evaporación (Método Hargreaves – Samani)	ev	mm/día	$ev = 0,0023R_A(t + 17,8)(t_{máx} - t_{mín})^{0,5}$
c	Caudal efluente corregido por evaporación	$Q_e$	m³/día	$Q_e = Q_i - 0,001A_{sup}ev$
<b>Remoción de coliformes termorresistentes en el efluente</b>				
d	Relación largo ancho de la lagunas	x	-	$x = \frac{B_{prom} * 0,7 * (N_{mamp} + 1)}{L_{prom}/(N_{mamp} + 1)}$
e	Coefficiente de dispersión	d	-	$d = \frac{x}{-0,26118 + 0,25392x + 1,0136x^2}$
f	Coefficiente de reducción bacteriana (Yánez 1984)	$K_b$	d <sup>-1</sup>	$K_b = 0,841 * (1,075)^{T-20}$
g	Constante "a" (Thirumurthi)	a	-	$a = \sqrt{1 + 4K_b O_s d}$
h1	Coefficiente de coliformes (Thirumurti 1969)	$N_f/N_o$	-	$\frac{N_f}{N_o} = \frac{4ae^{\frac{1-a}{2d}}}{(1+a)^2}$
h2	Coliformes termorresistentes efluente (Thirumurti 1969)	$N_e$	NMP/100ml	$N_e = \frac{N_f}{N_o} * N_i$
i	Coliformes termorresistentes corregidos por evaporación	$N_{ecorr}$	NMP/100ml	$N_{ecorr} = \frac{Q_i}{Q_e} * N_e$
<b>Concentración de DBO<sub>5</sub> en el efluente</b>				
j	Constante de decaimiento de primer orden para DBO <sub>5</sub> (Marais 1974)	k	d <sup>-1</sup>	$\frac{S_a}{S_e} = 1 + kt$
k	DBO <sub>5</sub> en el efluente	$DBO_e$	mgO <sub>2</sub> /L	$DBO_e = \frac{DBO_i}{k O_s + 1}$
l	DBO <sub>5</sub> en el efluente corregido por evaporación	$DBO_{ecorr}$	mgO <sub>2</sub> /L	$DBO_{ecorr} = \frac{Q_i}{Q_e} * DBO_e$
m	Cálculo de eficiencias de remoción	% <sub>rem</sub>	%	$\% = \frac{Valor\ afluyente - Valor\ efluente}{Valor\ afluyente} * 100$

Resultados con el caudal de diseño

El caudal de diseño de la PTAR de Sucre es de **20.724,00 m³/día**.

Tabla 6 Resultados con el caudal de diseño

Parámetro de cálculo		Unidad	LS1	LS2
Número de deflectores	$N_{mamp}$		14	14
Coliformes termorresistentes corregido	$N_{ecorr}$	NMP/100ml	1,97E+06	1,99E+06
DBO <sub>5</sub> en el efluente corregido	$DBO_{ecorr}$	mgO <sub>2</sub> /L	64,66	65,33
Parámetro de cálculo		Unidad	LM1	LM2
Número de deflectores	$N_{mamp}$		10	10
Coliformes termorresistentes corregido	$N_{ecorr}$	NMP/100ml	1,36E+06	1,35E+06
DBO <sub>5</sub> en el efluente corregido	$DBO_{ecorr}$	mgO <sub>2</sub> /L	56,85	57,10

Resultados de simulación con datos concurrentes en la PTAR de Sucre

En la actualidad, la planta de tratamiento no funciona con su caudal de diseño, por lo que se optó por realizar la simulación de resultados con un caudal promedio con los datos registrados en las últimas cuatro gestiones, obteniendo un resultado de **12.744,17 m³/día**.

Tabla 7 Resultados de simulación con datos concurrentes en la PTAR de Sucre

Parámetro de cálculo		Unidad	LS1	LS2
Número de deflectores	$N_{mamp}$		14	14
Coliformes termorresistentes corregido	$N_{ecorr}$	NMP/100ml	1,35E+06	1,38E+06
DBO <sub>5</sub> en el efluente corregido	$DBO_{ecorr}$	mgO <sub>2</sub> /L	48,20	48,81
Parámetro de cálculo		Unidad	LM1	LM2
Número de deflectores	$N_{mamp}$		10	10
Coliformes termorresistentes corregido	$N_{ecorr}$	NMP/100ml	7,46E+05	7,38E+05
DBO <sub>5</sub> en el efluente corregido	$DBO_{ecorr}$	mgO <sub>2</sub> /L	39,40	39,54

Eficiencias de remoción

Para comparar las eficiencias de remoción de DBO<sub>5</sub> y coliformes termorresistentes, se aprovechó los datos anuales de la gestión 2020.

Tabla 8 Eficiencia de remoción

			Entrada de planta	Salida de planta	Eficiencia [%]
Datos de diseño general	DBO <sub>5</sub>	Sin deflectores	423,04	71,80	83,03
		Con deflectores	423,04	56,98	86,53
	Coliformes termorresistentes	Sin deflectores	5,38E+07	4,56E+06	91,53
		Con deflectores	5,38E+07	1,36E+06	97,48
Datos concurrentes	DBO <sub>5</sub>	Sin deflectores	423,04	71,80	83,03
		Con deflectores	423,04	39,47	90,67
	Coliformes termorresistentes	Sin deflectores	5,38E+07	4,56E+06	91,53
		Con deflectores	5,38E+07	7,42E+05	98,62

Implementación, operación y mantenimiento de deflectores

El material considerado para una propuesta económica son paneles pretensados de hormigón (H-35), con sus respectivos postes de hormigón armado (H-21). Estos son materiales prefabricados y de colocación fácil y rápida.

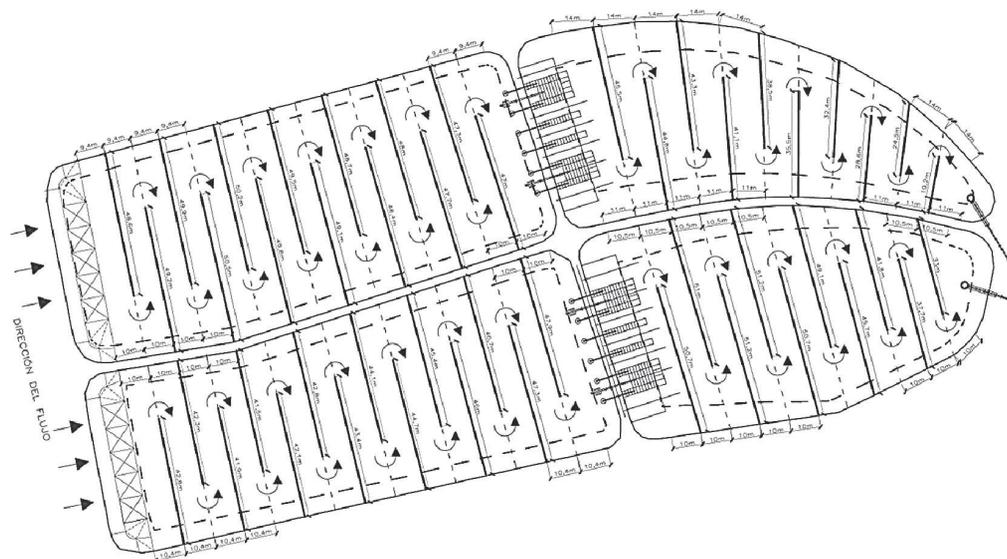


Figura 3 Esquema ubicación de deflectores

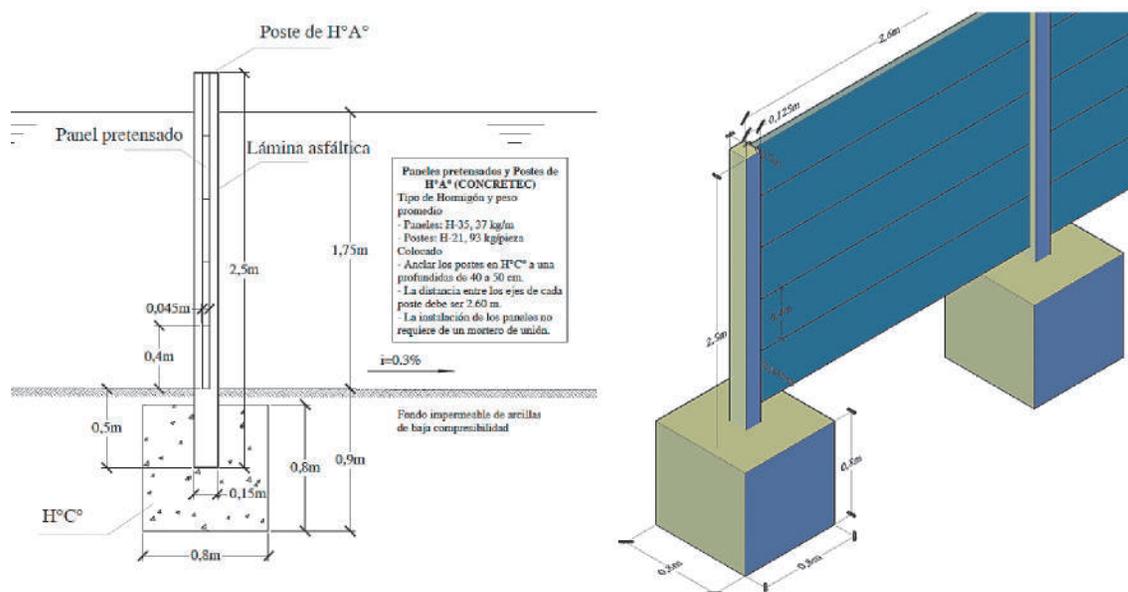


Figura 4 Detalle deflectores

## CONCLUSIONES

La PTAR de Sucre, respecto al caudal de ingreso, actualmente trabaja con el 61,5% (promedio) de su capacidad total.

Mediante la evaluación histórica de los parámetros físicos, químicos y biológicos del efluente de la PTAR de Sucre, se puede afirmar que las características de sólidos suspendidos totales y coliformes termoresistentes, no cumplen con el valor máximo establecido en el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH).

Es de gran importancia la correcta operación y mantenimiento de los diferentes sistemas de tratamiento. Se hace énfasis en el funcionamiento constante de los lechos percoladores, debido a que se pudo comparar los resultados de cuando éstos no actúan en el tratamiento. Al respecto, también se puede señalar que, a partir de que un lecho percolador comienza a funcionar, después de un tiempo sin estar trabajando, se da un periodo de al menos tres meses en retomar el proceso de tratamiento, debido a la nueva formación de biopelícula.

El tiempo de retención hidráulica en las lagunas de maduración, es demasiado bajo, siendo lo recomendable un mínimo de 5 días para garantizar resultados próximos al límite por norma.

Con el diseño de deflectores en las lagunas de sedimentación y de maduración, se comprobó que, su implementación contribuiría a una disminución considerable de coliformes termoresistentes en el efluente de la PTAR, incrementando las eficiencias de remoción por encima del 98% en relación al promedio de 90% (historial).

Se considera que los deflectores son una alternativa económica y apropiada para mejorar el estado actual de la PTAR, al no requerir de un proceso largo y complicado de implementación y no realizar un cambio esencial en la forma de la planta (como sería ampliaciones), además de no necesitar una operación especial y ser de poco mantenimiento.

Una solución, que si en un futuro puede volverse factible, es sin duda la ampliación de las lagunas de maduración. Por otro lado, se puede considerar complementar con tratamiento químico de desinfección, por ejemplo, estaciones de cloración a la salida de las lagunas de maduración, como se presentaba en versiones anteriores al proyecto final de la planta.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cuba, F., ANESAPA. (2004). Tratamiento de Aguas Residuales. Capacitación para la EPSA Boliviana N°17. La Paz.
- Alvarez, E. & Contreras, D., ANESAPA. (2004). Control de Calidad de Aguas Residuales. Capacitación para la EPSA Boliviana N°18. La Paz.
- Cuba, F., ANESAPA. (2004). Lodos y Aguas Servidas Tratadas. Capacitación para la EPSA Boliviana N°19. La Paz.
- E.L.A.P.A.S. (2003). Manual de Operación y Mantenimiento y Descripción de las Obras. Sucre.
- Catalán, J. (1997). Depuradoras Bases Científicas. Madrid: Editorial Bellisco.
- Romero, J. (1999). Tratamiento de Aguas Residuales por

Lagunas de Estabilización. (3ra ed.). Bogotá: Alfaomega Grupo Editor.

Romero, J. (2000). Tratamiento de Aguas Residuales. Teoría y principios de diseño. (3ra ed.). Colombia: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

Metcalf y Eddy. García, A. (Ed.). (1995). Ingeniería de Aguas Residuales. Tratamiento, Vertido y Reutilización. (3ra ed. Vol. I). Nueva York: McGraw-Hill.

Metcalf y Eddy. García, A. (Ed.). (1995). Ingeniería de Aguas Residuales. Tratamiento, Vertido y Reutilización. (3ra ed. Vol. II). Nueva York: McGraw-Hill.

Wagner, W. (2010). Recomendaciones para la elección de plantas de tratamiento de agua residual aptas para Bolivia. La Paz: ANESAPA y PROAPAC.

Wagner, W. (2005). Borrador Peritaje sobre posibilidades de la mejora de la planta de tratamiento de Sucre. ANESAPA.

Cortés, F., Treviño, A. & Tomasini, A. (2017). Dimensionamiento de lagunas de estabilización. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Sejas, G. (2003). Desarrollo del Proceso de Control Operacional y Mantenimiento de la Planta Depuradora de Aguas Residuales de Sucre. Proyecto de Grado, UMRPS-FXCH. Sucre, Bolivia.

Gobierno Autónomo Municipal de Yotala. (2017). Plan Territorial de Desarrollo Integral 2016 – 2020. Yotala.

Ley 1333 de 1992. Del Medio Ambiente. 27 de abril de 1992 (Bolivia).

Empresa Local de Agua Potable y Alcantarillado Sucre (ELAPAS). (2012). PLANTA DE AGUAS RESIDUALES. Nuestros Servicios - E.L.A.P.A.S. <http://www.elapas.com.bo/area-operativa/planta-de-aguas-residuales/>

