

## DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTACTOR BIOLÓGICO ROTATORIO (CBR) PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES A ESCALA PILOTO

### DESIGN, CONSTRUCTION AND EVALUATION OF A ROTATING BIOLOGICAL CONTRACTOR (RBC) SYSTEM FOR MUNICIPAL WASTEWATER TREATMENT AT PILOT SCALE

Ivette Echeverría<sup>1,3</sup>, Oliver Saavedra<sup>1</sup>, Ramiro Escalera<sup>2</sup>, Gustavo Heredia<sup>3</sup>, Renato Montoya<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Centro de Investigaciones en Ingeniería Civil y Ambiental (CIICA)

<sup>2</sup>Centro de Investigaciones en Procesos Industriales (CIPI)  
Universidad Privada Boliviana

<sup>3</sup>Fundación Aguatuya, Cochabamba, Bolivia  
oliversaavedra@upb.edu

(Recibido el 30 de mayo 2020, aceptado para publicación el 16 de junio 2020)

#### RESUMEN

En este estudio se diseñó, implementó y evaluó el desempeño de una planta piloto de tratamiento de aguas residuales domésticas, basada en contactores biológicos rotatorios (CBR). La demanda de fuentes de agua en zonas semi-áridas ocasiona que se reutilicen aguas residuales en agricultura, aunque no tengan ningún grado de tratamiento. Los CBR son sistemas de tratamiento aerobio llevado a cabo por microorganismos adheridos sobre discos que rotan lentamente a través de un flujo de agua residual. Entre las ventajas del sistema se puede mencionar, los niveles potencialmente altos de eficiencia, que ocupan poco espacio y se pueden ampliar modularmente; sin embargo, son sistemas costosos de implementar, debido a que se requiere de la importación de los discos. En este estudio se escogió el poliestireno por su disponibilidad local y se verificó que es un medio de adherencia adecuado para los microorganismos. Las eficiencias máximas alcanzadas por el CBR una vez concluido el periodo de aclimatación fueron: 81%, 75% y 85% para la remoción de DQO total, DQO soluble y SST. La eficiencia global del sistema constituido por un sedimentador primario, un CBR de 3 etapas y un sedimentador secundario, alcanzó niveles de 68-79% para DQO total, 68-77% de DQO soluble y 81-99% de SST. Los niveles de tratamiento alcanzan valores dentro de los límites establecidos en la legislación boliviana para descarga de aguas residuales, por lo que es recomendable su escalamiento en condiciones climáticas similares a las del estudio.

**Palabras Clave:** CBR, Eficiencia, Piloto, Agua Residual, PTAR Compacta, Tratamiento Aerobio, Bolivia.

#### ABSTRACT

In this study, a pilot scale domestic wastewater treatment plant based on rotating biological contactors (RBC), was designed, built, and evaluated. The demand of sources of water in semi-arid zones causes wastewater reuse in agriculture even without any treatment. RBC is an aerobic treatment system carried out by microorganisms attached to discs that rotate slowly through a stream of wastewater. Among the advantages of the system it can be mentioned, the potentially high levels of efficiency, the small footprint, and that can be expanded modularly; however, they are expensive systems to implement, due to the high cost of imported discs. In this study, one side rough polystyrene was chosen due to its local availability and it was verified that it is a suitable means for microorganisms to adhere. The maximum efficiencies reached by the RBC once acclimatization period was concluded, were: 81%, 75% and 85% for the removal of TCOD, SCOD and TSS. The overall efficiency of the system consisting of a primary settler, a 3-stage RBC and a secondary settler, reached levels of 68-79% for total COD, 68-77% of dissolved COD and 81-99% of TSS. Treatment levels are within the limits established in Bolivian legislation for wastewater discharge, so scaling up of this technology in climatic conditions similar to those of this study is recommended.

**Keywords:** RBC, Efficiency, Pilot, Wastewater, Compact WWTP, Aerobic Treatment, Bolivia.

#### 1. INTRODUCCIÓN

La demanda creciente de agua para consumo, producción industrial y agricultura; situación agravada por la baja disponibilidad del recurso debido a efectos del cambio climático y el incremento de la población, la contaminación de aguas superficiales y subterráneas, entre otros, ha ocasionado que el uso de agua residual tratada o sin tratar para la

agricultura sea una práctica común en varias regiones semiáridas de Bolivia. La implementación de sistemas de tratamiento constituye un mecanismo de barrera para reducir los riesgos asociados con el reúso o descarga de aguas residuales; sin embargo, en muchos casos se llevan a cabo tratamientos deficientes. Actualmente en Bolivia, el 86 % de la población tiene acceso a servicios básicos de saneamiento. De acuerdo con un inventario realizado por el Ministerio de Medio Ambiente y Agua, hasta 2016 la cobertura de tratamiento de agua alcanzaba el 30,5 % y el 78% del total de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) inventariadas no mostró un funcionamiento adecuado, en la mayoría de los casos debido a una operación y mantenimiento inadecuados y a una ingeniería cuestionable en los proyectos [1]. En la mayoría de las regiones, se espera que el tratamiento de las aguas residuales domésticas o municipales deba cumplir con ciertos criterios, principalmente de bajo costo y bajo requerimiento mecánico, bajo consumo energético y no tener requerimientos especializados para la operación. Sin embargo, es necesario un cambio de paradigma en el cual se empiecen a considerar opciones tecnológicas fuera de las convencionales, entre éstas, al contactor biológico rotatorio (CBR), que es un sistema de tratamiento meritorio de estudio debido a sus numerosas ventajas.

Los CBR son una buena alternativa para la remoción de materia orgánica y nitrógeno dada su factibilidad, simplicidad en el diseño y operación, corto tiempo de arranque, bajo requerimiento de terreno, bajo consumo de energía, y bajos costos de operación y mantenimiento [2]. Los CBR se definen como un proceso aerobio de biopelícula adherida que consiste en un conjunto de discos montados sobre un eje y dispuestos en el interior de un tanque. El agua residual fluye a través del tanque mientras que el conjunto de discos rota accionado por un motor. La rotación del sistema permite la adherencia de una población de microorganismos que llevan a cabo procesos de depuración de materia orgánica alternando el contacto entre el agua residual y el aire [3]. El primer CBR fue utilizado a principios del año 1900 y consistía en un cilindro con listones de madera [4]. La aparición del poliestireno marcó el comienzo de una aplicación más comercial de los CBR con el primer sistema a gran escala instalado en Alemania a principios de los años 1960. Desde entonces, se han hecho mejoras significativas en los CBR utilizando diversos materiales como medio de soporte [5]. Actualmente, existen miles de instalaciones, ubicadas principalmente en el oeste de Alemania, Suiza y Francia seguidos de Italia, Austria, Gran Bretaña, y los países Escandinavos [6]. A pesar de las grandes ventajas que los CBR ofrecen, los procesos han sido restringidos a instalaciones relativamente pequeñas debido a sus elevados costos de construcción, principalmente, el costo que involucra el material de soporte, razón por la cual su uso es muy limitado en países de Latinoamérica. Más aún, existen algunos factores como la tasa de carga orgánica (CO), el tiempo de retención hidráulica (TRH), el porcentaje de sumergencia, la velocidad de rotación, la temperatura y, principalmente, los niveles de oxígeno disuelto (OD), que afectan el desempeño de un CBR [7]–[9]. Los niveles de OD son afectados por la temperatura y por la altitud dado que a mayores altitudes la presión parcial de oxígeno en la atmósfera es menor [10].

Por otro lado, no existen reportes a escala laboratorio, piloto o a gran escala de CBR implementados en Bolivia. El éxito en el diseño de PTAR a gran escala generalmente es precedido por los ensayos que se hayan realizado en modelos a escala laboratorio o a escala piloto [11], cuyos resultados podrían ser útiles en este contexto dado que Bolivia cuenta con regiones con gradientes de temperatura variables y está ubicado a elevada altitud con respecto del nivel del mar.

El objetivo de este estudio fue el diseño y puesta en marcha de un prototipo de CBR para el tratamiento de aguas residuales domésticas empleando materiales y servicios disponibles localmente, y su evaluación que permita concluir acerca de la idoneidad de escalar e implementar una PTAR, basada en esta tecnología.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

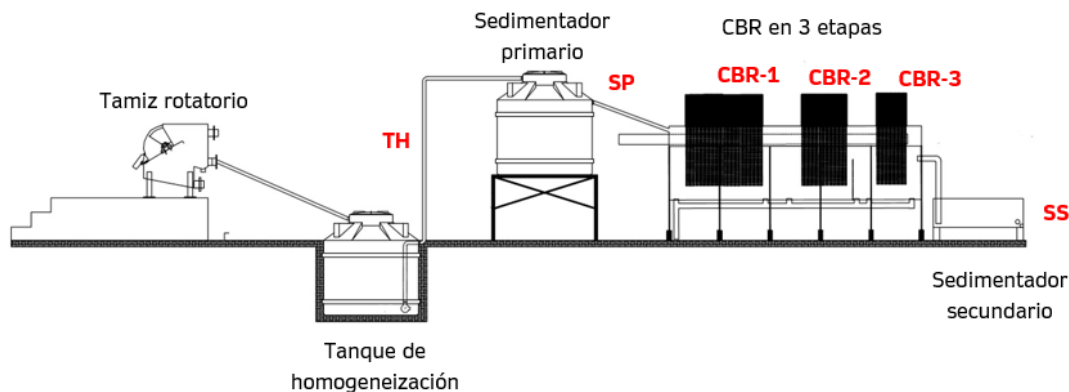
### 2.1 Configuración de la PTAR piloto

#### ▪ Características de las aguas residuales para el diseño del prototipo

El prototipo de CBR fue concebido con la idea de ser operado con las aguas influentes a la PTAR del municipio de Tolata en Bolivia. Las razones fueron principalmente debido a que ya se contaba con datos de caracterización de las aguas residuales de un estudio previo realizado por [12], y debido también a que se deseaba que el prototipo operara con aguas residuales reales en composición en el tiempo, y bajo condiciones climáticas de moderadas temperaturas que son características del Valle Alto de Cochabamba. Las características de las aguas residuales consideradas para el diseño del prototipo fueron: 396 mg-DBO<sub>5</sub>/L, 795 mg-DQO/l y 361 mg-SST/l. El caudal para el cual fue diseñado fue 0,13 l/s que es aproximadamente una décima parte del caudal que actualmente ingresa a la PTAR de Tolata.

El prototipo fue emplazado dentro los predios de la PTAR de Tolata. Para su operación, una fracción del flujo que ya había pasa a través de un tamiz rotatorio que pertenece a la PTAR de Tolata, es conducido hacia un tanque de almacenamiento u homogeneización y de ahí conducido hacia las diferentes unidades que componen el prototipo.

Las unidades que componen el prototipo son: un tanque de homogeneización, un sedimentador primario, un CBR de 3 etapas y un sedimentador secundario como se muestra en el esquema de la Figura 1.



**Figura 1:** Esquema general del prototipo CBR.

Un tanque de polietileno de 1 m<sup>3</sup>, que contiene un panel separador en su interior fue utilizado como sedimentador primario.

El CBR fue diseñado en 3 etapas basado en algunos parámetros recomendados en la literatura [13], [14]. El reactor CBR tiene un volumen total de 1,4 m<sup>3</sup>, un total de 151 discos de 0,9 m de diámetro distribuidos de la siguiente manera: 76 discos en la primera etapa, 45 en la segunda etapa y 30 en la tercera etapa. La superficie útil para la adherencia de la biopelícula es de 187 m<sup>2</sup> para una sumergencia del 40 % de la superficie de los discos. La primera etapa ocupa ½ del total del área y la segunda y tercera etapa ocupan 3/5 y 2/5 respectivamente del área restante. La distribución de áreas se realizó de esta manera debido a que la primera etapa es la que mayor carga orgánica soporta [15]. Los discos fueron fabricados con láminas de poliestireno que tiene una cara rugosa y otra lisa. El tanque, los separadores, el eje y la cubierta del CBR fueron construidos en acero inoxidable para evitar los posibles daños por corrosión que puede ocasionar el agua residual. Se utilizaron 2 tanques rectangulares de 0,3 m<sup>3</sup> cada uno, como sedimentadores secundarios. Estos dos tanques fueron dispuestos en paralelo unidos a una descarga en común.

## 2.2 Arranque

El arranque del sistema consistió en la circulación del agua residual a través de todas las unidades del prototipo hasta el establecimiento de la biopelícula sobre la superficie de los discos. No se utilizó ningún tipo de inóculo para acelerar la aclimatación del CBR. Las condiciones de operación para el periodo de arranque fueron: 0,20 l/s de caudal para un TRH de 1,6 horas aproximadamente, a una velocidad de rotación de 2 RPM. Después de 2 semanas de operación, se observó la aparición de una delgada capa de biopelícula sobre la superficie de los discos. Se realizaron mediciones de pH, temperatura, OD, DQO total, DQO disuelta, SST, N-NH<sub>3</sub> y P para monitorear la evolución del desempeño del prototipo en el tiempo. El desarrollo de la biopelícula fue monitoreado visualmente cada 2 semanas.

## 2.3 Evaluación

Para verificar la eficiencia de cada una de las unidades que componen el prototipo, se tomaron muestras puntuales a la entrada y salida de cada unidad del tratamiento para el análisis de demanda química de oxígeno total (DQO total) y soluble (DQO soluble), sólidos suspendidos totales (SST), nitrógeno amoniacal (N-NH<sub>3</sub>) y fósforo (P). En el CBR, las muestras se tomaron a la entrada y salida de cada una de sus etapas. Adicionalmente se realizaron mediciones in situ de pH, temperatura y OD. Los análisis de laboratorio se realizaron de acuerdo a los métodos establecidos en el *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* [16]. Los códigos asignados a los puntos de monitoreo se muestran en la Figura 1 y se describen en la Tabla 1.

TABLA 1 - DESCRIPCIÓN DE LOS PUNTOS DE MONITOREO

Código	Punto de monitoreo
TH	Efluente del tanque de homogeneización
SP	Efluente del sedimentador primario
CBR-1	Efluente de la primera etapa del CBR
CBR-2	Efluente de la segunda etapa del CBR
CBR-3	Efluente de la tercera etapa del CBR
SS	Efluente del sedimentador secundario

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Instalación del prototipo

Los componentes del prototipo propuesto se muestran en la Figura 2.



**Figura 2:** Planta piloto CBR en Tolata, Bolivia.

El agua residual almacenada en el tanque de homogeneización es conducida mediante bombeo hacia el sedimentador primario y de ahí al CBR y al sedimentador secundario por gravedad.

#### 3.2 Desarrollo de la biopelícula

Se observó el desarrollo de una delgada capa de biopelícula después de 2 semanas de operación. Aproximadamente al mes de operación, la capa cubría la superficie entera de los discos y había ganado mayor espesor. Se observó además que la biopelícula presentaba un color café característico del consorcio de microorganismos que se desarrolla en medio aerobio [17]. El espesor de la biopelícula era mayor en los discos de la primera etapa y se iba haciendo más delgado en la segunda y tercera etapas.

Algunos investigadores como [18] y [19] reportaron haber alcanzado el estado estacionario en un periodo mayor a 30 días, incluso habiendo utilizado algún tipo de inóculo para acelerar la estabilización del sistema. Otros, como [20] redujeron ese periodo de estabilización utilizando un CBR de malla empacada en lugar de biodiscos. El tiempo de estabilización de este prototipo es similar a aquellos reportados en la literatura [21].

#### 3.3 Desempeño del prototipo CBR

La variación de las concentraciones de DQO total, DQO disuelta y SST a través del tratamiento en los distintos monitoreos, se muestra en las figuras 3, 4 y 5.

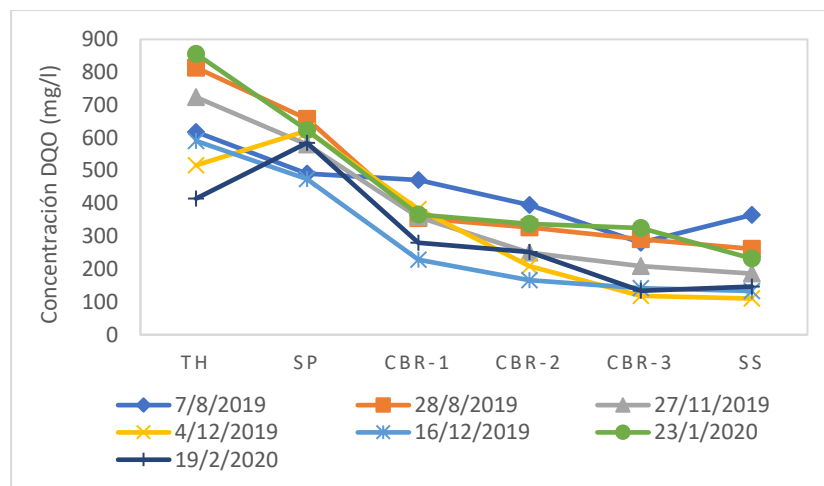


Figura 3 - Variación de la concentración de DQO total en el tratamiento

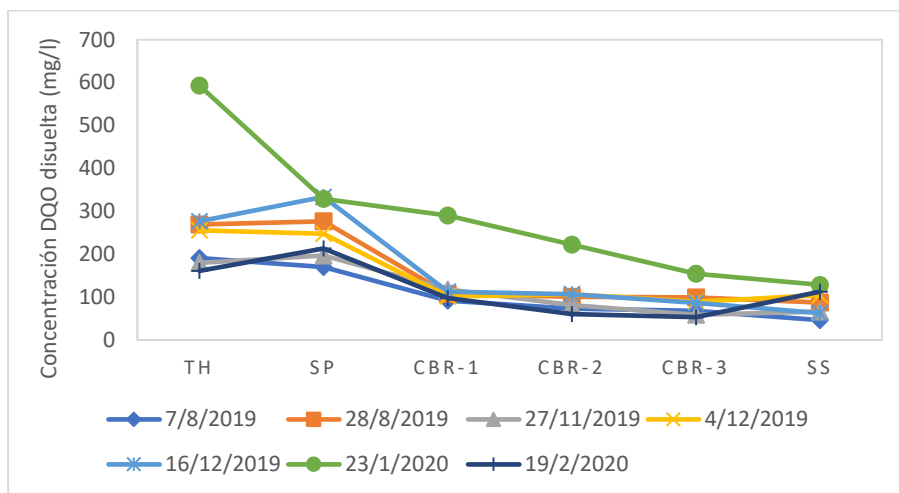


Figura 4 - Variación de la concentración de DQO soluble en el tratamiento.

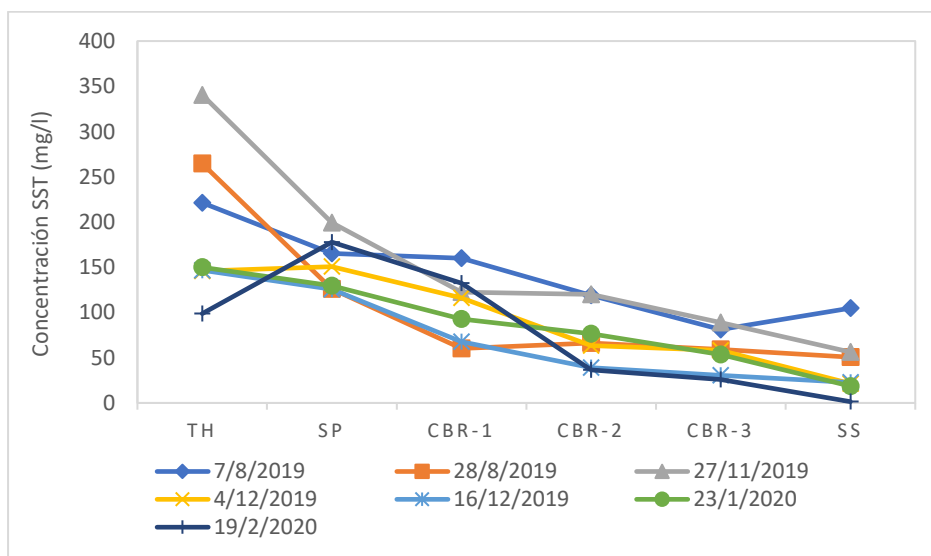


Figura 5: Variación de la concentración de SST en el tratamiento.

Los parámetros operacionales del CBR y la eficiencia de cada una de las etapas durante el periodo de evaluación se presentan en la Tabla 2.

**TABLA 2 - PARÁMETROS OPERACIONALES DEL CBR Y EFICIENCIA DE CADA UNA DE LAS ETAPAS**

Fecha monitoreo	Caudal (l/s)	Velocidad de rotación (RPM)	TRH (horas)	Carga orgánica (g-DQO/m <sup>2</sup> ·d)			Eficiencia (%)		
				CBR-1	CBR-2	CBR-3	CBR-1	CBR-2	CBR-3
7/8/2019	0,20	2,0	1,6	90,7	145,2	172,4	3,9	16,2	30,7
28/8/2019	0,21	2,5	1,5	127,6	114,9	150,0	46,0	7,9	11,9
27/11/2019	0,17	2,5	1,9	91,0	93,8	92,7	38,1	30,2	17,5
4/12/2019	0,12	3,0	2,6	68,9	70,7	54,7	38,5	45,3	45,9
16/12/2019	0,13	3,0	2,4	56,9	45,8	47,1	51,8	27,4	15,5
23/1/2020	0,11	3,0	3,0	61,1	59,8	78,2	41,2	7,6	4,2
19/2/2020	0,14	2,5	2,3	72,9	58,4	74,3	52,0	10,1	49,7
<b>Promedio</b>	0,15	2,6	2,2	81,3	84,1	95,6	38,8	20,7	25,1

La máxima carga orgánica que puede soportar la primera etapa de un CBR está dentro de un rango recomendado de 40-60 g-DBO<sub>5</sub>/m<sup>2</sup>·d para el diseño [13], [14]. En términos de DQO, esta carga debería estar comprendida entre 80-120 g-DQO/m<sup>2</sup>·d, debido a la relación DBO<sub>5</sub>/COD reportada en la caracterización del afluente de las aguas residuales de la PTAR de Tolata [12], que además es característica de aquellas aguas residuales cuyo origen es doméstico en su mayoría. La carga orgánica que soportó el CBR durante el periodo de evaluación está dentro de este rango recomendado con un valor medio de 81,3 g-DQO/m<sup>2</sup>·d. La carga orgánica soportada por la segunda y tercera etapa fue por lo general menor a la soportada en la primera etapa.

La velocidad de rotación del sistema fue ajustada a 2 RPM; sin embargo, se incrementó gradualmente, primero a 2,5 RPM y luego a 3,0 RPM. El incremento gradual en la velocidad de rotación se hizo con el propósito de mejorar los niveles de OD, especialmente cuando los valores medidos estaban por debajo de los 2,0 mg-OD/l (Tabla 3) que es el valor óptimo recomendado para garantizar un funcionamiento eficiente del CBR [22].

El tiempo de retención hidráulica de operación estuvo comprendido entre 1,5-3,0 horas debido a las variaciones de caudal. La eficiencia reportada en el primer monitoreo, aproximadamente a las 2 semanas del arranque del sistema, fue baja comparada con la eficiencia reportada a partir del segundo monitoreo, que es más o menos después de un mes del arranque.

En la Tabla 3 se presentan datos adicionales de la media y la desviación estándar de los parámetros medidos en la evaluación de la planta piloto en todas sus etapas.

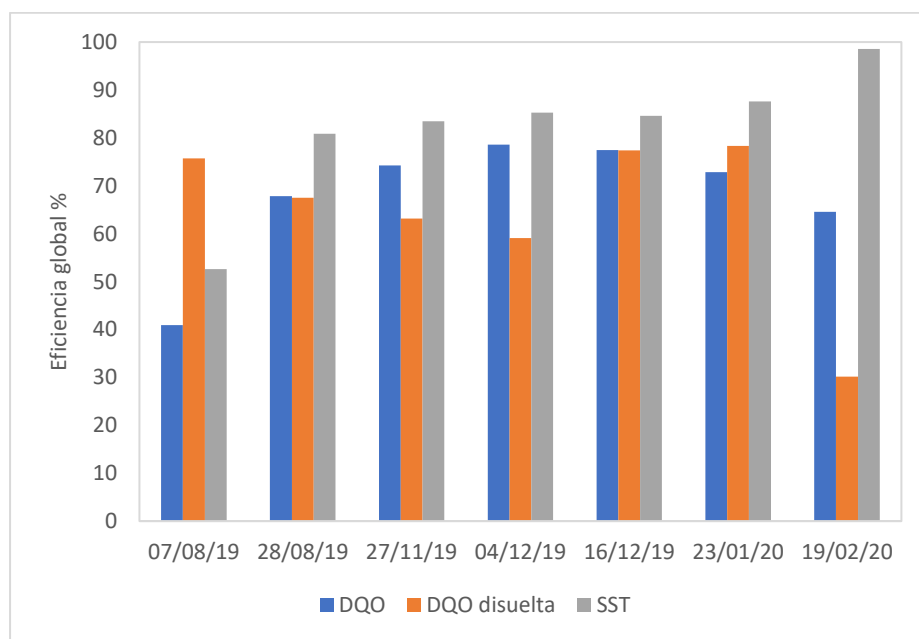
**TABLA 3 - MEDIA Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LOS PARÁMETROS EVALUADOS EN LA PLANTA PILOTO**

Punto de Monitoreo	pH	Temperatura °C	OD (mg/l)	DQO total (mg/l)	DQO soluble (mg/l)	SST (mg/l)	N-NH <sub>3</sub> (mg/l)	P (mg/l)
TH	7,4±0,3	20,6±2,5	0,27±0,6	648±160	275±148	195±84	77±22	11,1±2,2
SP	7,3±0,2	20,0±3,3	0,46±0,5	576±69	252±64	153±29	77±14	10,8±1,7
CBR-1	7,8±0,1	18,8±3,9	1,09±0,7	349±77	131±71	107±36	70±13	10,0±2,3
CBR-2	7,8±0,1	18,4±3,0	1,00±0,7	277±80	107±54	74±34	65±13	9,8±1,9
CBR-3	7,9±0,1	17,8±2,7	1,32±0,8	214±85	87±34	57±23	61±11	9,6±2,5
SS	7,6±0,1	18,0±3,1	0,72±0,6	205±89	87±30	39±35	60±17	9,9±2,4
<b>Eficiencia %</b>				<b>68±13</b>	<b>64±17</b>	<b>82±14</b>	<b>16±33</b>	<b>10±17</b>

El promedio de la concentración de la DQO total es menor a aquella utilizada para el diseño. Esto se debe principalmente a que las características del agua residual doméstica son muy variables. Las concentraciones alcanzadas en el efluente cumplen con los requerimientos del reglamento en materia de contaminación hídrica de la ley 1333 que establece 250 mg-DQO/l y 80 mg-SST/l para descargas en cuerpos de agua sin clasificar.

El rango de temperatura medido en el periodo de estudio está comprendido entre 17,8-20,6 °C; sin embargo, debe considerarse que se realizaron mediciones puntuales y que el rango de temperaturas a lo largo del día es mucho más amplio que ese. Los niveles de oxígeno disuelto pueden ser afectados por la temperatura dado que afecta a la solubilidad del oxígeno, y por la altitud del sitio de emplazamiento ya que la presión parcial de oxígeno en la atmósfera disminuye con la altitud y por tanto la tasa de transferencia de oxígeno también lo hace. La altura del lugar de emplazamiento (Tolata), es de 2728 metros sobre el nivel del mar.

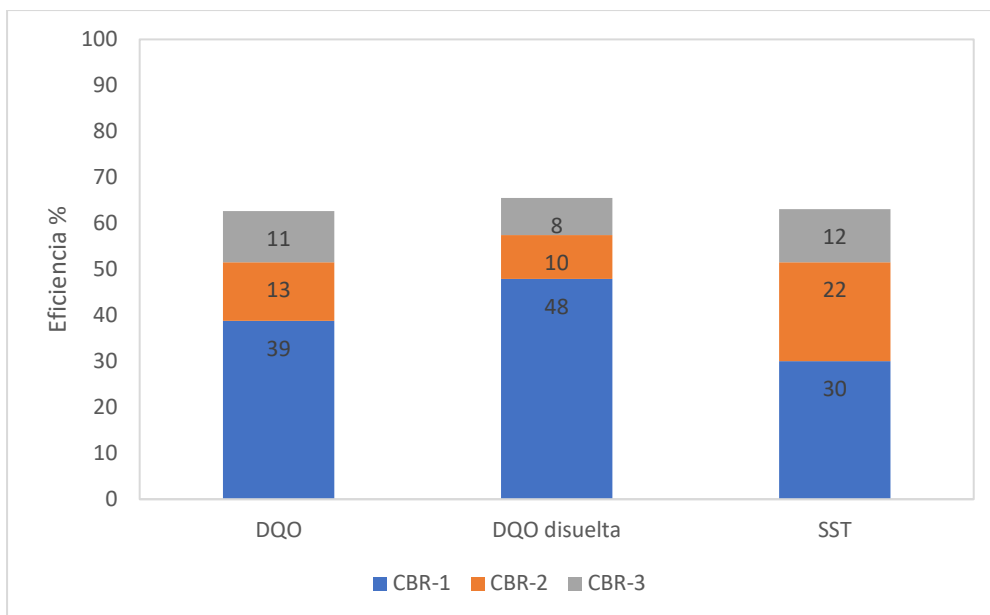
Con todos los datos colectados, la eficiencia global de toda la planta piloto fue calculada y los resultados se muestran en la Figura 6.



**Figura 6:** Eficiencia global de la planta piloto.

La gráfica refleja lo que se había comentado anteriormente, que la eficiencia en el primer monitoreo es menor que en el resto de los monitoreos subsecuentes. Esto se debe a que el CBR se encontraba en una etapa de estabilización y la biopelícula aún se estaba desarrollando. Entre el segundo y el sexto monitoreo, los niveles de eficiencia permanecen en un rango de 68-79 % para DQO total, entre 68-77% para DQO soluble y entre 81-99 % para SST excepto para el último monitoreo en donde se registraron valores bajos de OD. Los niveles bajos de OD están principalmente relacionados a la sobrecarga orgánica y se manifiestan con la aparición de una biopelícula de color grisáceo-blanquecino que indica la presencia de microorganismos no deseados, como bacterias filamentosas u hongos fibrosos que se desarrollan en medios anaeróbicos o anóxicos [3], [23]. En este caso, la aparición de biopelícula blanquecina pudo estar relacionada al excesivo desprendimiento de biomasa debido al incremento en la velocidad de rotación de 2,5 a 3,0 RPM, que se acumula en los compartimientos del tanque y que consume el OD, por lo que fue necesario realizar un mantenimiento al sistema que consistía en la remoción de la biomasa sobrenadante de los compartimientos del tanque.

Debido a que la evaluación del desempeño del CBR es de especial interés en este estudio, en la Figura 7 se presenta la eficiencia promedio en la remoción de DQO total, DQO soluble y SST alcanzada durante el periodo de estudio, además de la contribución de cada etapa del reactor.



**Figura 7** - Eficiencia promedio y aporte por etapas en el CBR.

El CBR por si solo alcanza un promedio de 63%, 66% y 64% en la remoción de DQO total, DQO soluble y SST respectivamente con una mayor contribución por parte de la primera etapa incluyendo la baja eficiencia reportada durante el periodo de estabilización. Las máximas eficiencias alcanzadas por el CBR cuando ya se ha completado el periodo de aclimatación del sistema fueron 81, 75 y 85 % de DQO, DQO disuelta y SST.

Este estudio no considera la evaluación de la eficiencia en la remoción de amonio y fósforo debido a que el diseño no fue concebido con este propósito. Además, para que los procesos de nitrificación tomen lugar es necesario que los niveles de  $\text{DBO}_5$  disminuyan hasta alcanzar niveles por debajo de los 14  $\text{mg-DBO}_5/\text{l}$  [3], o en este caso en específico, que los niveles de DQO alcancen valores por debajo de 28  $\text{mg-DQO/l}$  a partir de la segunda etapa, lo cual no acontece. Por otro lado, los efluentes en el área de estudio son destinados al riego de cultivos debido a la escasa disponibilidad de otras fuentes de agua para este propósito, por lo que la remoción de nutrientes no es deseable.

#### 4. CONCLUSIONES

Se diseñó, construyó y evaluó una planta piloto de tratamiento que emplea un CBR como tratamiento biológico principal, empleando materiales y servicios locales. Se utilizó poliestireno rugoso como medio de soporte y se verificó que es un material apropiado para el desarrollo de la biopelícula. El periodo de aclimatación del CBR fue de 1 mes aproximadamente. Bajo condiciones óptimas de operación, TRH de 2,6 horas y velocidad de rotación comprendida entre 2,5 y 3 RPM, el CBR alcanza por si solo una máxima remoción del 81%, 75% y 85% en la remoción de DQO total, DQO soluble y SST respectivamente. La eficiencia global alcanzada por el prototipo, sin considerar el periodo de aclimatación, alcanza niveles comprendidos entre 68-79% para DQO total, 68-77% para DQO soluble y 81-99% para SST. Las concentraciones medias encontradas a la salida del prototipo fueron: 205  $\text{mg-DQO total/l}$ , 87  $\text{mg-DQO soluble/l}$ , 39  $\text{mg-SST/l}$ , 60  $\text{mg-N-NH}_3/\text{l}$  y 10  $\text{mg-P/l}$  que cumplen con las regulaciones establecidas para descargas en la ley boliviana excepto para  $\text{N-NH}_3$  y P, sin embargo, el contenido de nutrientes permite el reúso para el riego controlado de cultivos. En líneas generales, el CBR acompañado de un sedimentador primario y un sedimentador secundario u otro postratamiento, constituye un proceso con un gran potencial para ser escalado e implementado en condiciones climáticas con características similares a las de este estudio.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a las agencias financiadoras: la Agencia Española de Cooperación Internacional para el desarrollo (AECID) a través del Programa de redes de Conocimiento e Innovación en Medioambiente, Agua y



Saneamiento (CIMAS) y la embajada de Suecia en Bolivia a través del proyecto “Modelos descentralizados de saneamiento en Bolivia” que está siendo ejecutado por Aguatuya, que co-financiaron el desarrollo del presente estudio.

## 6. REFERENCIAS

- [1] Ministerio de Medio Ambiente y Agua, “Estrategia nacional de tratamiento de aguas residuales (ENTAR),” Bolivia, 2020.
- [2] S. Cortez, P. Teixeira, R. Oliveira, and M. Mota, “Bioreactors: Rotating Biological Contactors,” in *Encyclopedia of Industrial Biotechnology: Bioprocess, Bioseparation, and Cell Technology*, no. April 2016, M. . Flickinger, Ed. 2009, pp. 1013–1030.
- [3] L. K. Wang, J.-H. Tay, S. Tiong-Lee Tay, and Y.-T. Hung, *Environmental Bioengineering*, Volume 11. Human Press, 2010.
- [4] P. Mathure and A. Patwardhan, “Comparison of mass transfer efficiency in horizontal rotating packed beds and rotating biological contactors,” *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, vol. 80, no. May 2004, pp. 413–419, 2005.
- [5] A. Deloya M., “Biodiscos: una alternativa de tratamiento biológico para aguas residuales cuando no se dispone de grandes extensiones de terreno,” *Tecnol. en marcha*, vol. 13, no. 3, p. 3, 2001.
- [6] R. L. Antonie, *Fixed biological surfaces-wastewater treatment: the rotating biological contactor*. CRC press, 2018.
- [7] S. Cortez, P. Teixeira, R. Oliveira, and M. Mota, “Rotating biological contactors: A review on main factors affecting performance,” *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.*, vol. 7, no. 2, pp. 155–172, 2008.
- [8] V. G. Waskar, G. S. Kulkarni, and V. S. Kore, “Review on Process , Application and Performance of Rotating Biological Contactor (RBC),” *Int. J. Sci. Res. Publ.*, vol. 2, no. 7, pp. 1–6, 2012.
- [9] F. Hassard, J. Biddle, E. Cartmell, B. Jefferson, S. Tyrrel, and T. Stephenson, “Rotating biological contactors for wastewater treatment – A review,” *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 94, no. August, pp. 285–306, 2015.
- [10] S. Dutta, “Mathematical Modeling of the Performance of a Rotating Biological Contactor for Process Optimisation in Wastewater Treatment,” Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH), 2007.
- [11] D. B. Spengel and D. A. Dzombak, “Biokinetic modeling and scale-up considerations for rotating biological contactors,” *Water Environ. Res.*, vol. 64, no. 3, pp. 223–235, 1992.
- [12] I. Echeverría R., L. Machicado, O. Saavedra V., R. Escalera, G. Heredia, and R. Montoya, “Domestic wastewater treated with an anaerobic baffled reactor followed by gravel filters as a potential to be used in agriculture area in Tolata, Bolivia,” *Investigacion & Desarrollo*, vol. 19/1, pp. 63–72, 2019.
- [13] I. Metcalf and Eddy, *Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización*, 4th ed. 2003.
- [14] M. Scholz, “Rotating Biological Contactors,” in *Wetlands for Water Pollution Control*, vol. 4, Amsterdam: Elsevier, 2016, pp. 87–89.
- [15] R. Dautant, “Curso internacional de tratamiento de aguas residuales,” in *Congreso Bolivariano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, 2018.
- [16] APHA/AWWA/WEF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 1999.
- [17] F. L. Evans, “Consideration of first-stage organic overloading in rotating biological contactor design,” *J. Water Pollut. Control Fed.*, vol. 57, no. 11, pp. 1094–1098, 1985.
- [18] G. Ayoub, P. Saikaly, M. El-Fadel, and E. Baydoun, “Impact of step-feed on COD and BOD5 removal in rotating biological contactors,” *Environ. Eng. Sci.*, vol. 21, no. 5, pp. 558–568, 2004.
- [19] A. B. Gupta and S. K. Gupta, “Simultaneous carbon and nitrogen removal from high strength domestic wastewater in an,” *Water Res.*, vol. 35, no. 7, pp. 1714–1722, 2001.
- [20] T. Yun-lu *et al.*, “Performance of a modified RBC system in simulated municipal wastewater treatment,” *Water Sci. Technol.*, vol. 66, no. 9, pp. 2014–2019, 2012.
- [21] S. V. Pylnik and I. G. Dueck, “Startup simulation for a rotating biological contactor,” *Theor. Found. Chem. Eng.*, vol. 46, no. 1, pp. 72–79, 2012.
- [22] S. E. Williams, “Oxygen Transfer – RBCs,” 2014.
- [23] L. F. Evans, “Consideration of first-stage organic overloading in rotating biological contactor design,” *J. Water Pollut. Control Fed.*, vol. 57, pp. 1094–1098, 1985.