

Eficiencia vinculada a la operación y mantenimiento de pequeñas plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas en Cochabamba, Bolivia

Efficiency linked to the operation and maintenance of small domestic wastewater treatment plants in Cochabamba, Bolivia

Álvaro Rodolfo Mercado Guzmán ⁽¹⁾, Claudia Ximena Cossío Grágeda ⁽²⁾ y Mariela Copa Mitma ⁽³⁾

⁽¹⁾Centro de Aguas y Saneamiento Ambiental. Facultad de Ciencias y Tecnología. Universidad Mayor de San Simón. Cochabamba. Bolivia. Alvaromercado.g@fcyt.umss.edu.bo. ⁽²⁾Chalmers University of Technology, Department of Architecture and Civil Engineering, Suecia. claudia.cossio@chalmers.se; ⁽³⁾Centro de Aguas y Saneamiento Ambiental. Facultad de Ciencias y Tecnología. Universidad Mayor de San Simón. Cochabamba. Bolivia. mary_201204@hotmail.com

Alvaromercado.g@fcyt.umss.edu.bo

Resumen. La gestión de las aguas residuales domésticas en pequeñas poblaciones en Bolivia (2000- 10.000 habitantes) presenta deficiencias que llevan a que las plantas de tratamiento no cumplan con el objetivo final de reducir la contaminación del medio ambiente, evitando así el deterioro de los cuerpos receptores.

El objetivo del presente trabajo es encontrar un vínculo entre la eficiencia de plantas de tratamiento de pequeñas poblaciones en el departamento de Cochabamba y el tipo de operación y mantenimiento que estas implementan. Se realizaron los diagnósticos de eficiencia de plantas de tratamiento de aguas residuales: cinco rurales y una urbana considerando las tecnologías que se incluyen en el tren de tratamiento, la eficiencia de tratamiento de acuerdo a cinco parámetros básicos de evaluación de las aguas residuales (Sólidos Suspendidos Totales, Demanda Bioquímica de Oxígeno, Demanda Química de Oxígeno, Coliformes Termotolerantes), y el tipo operación y mantenimiento que realizan. La metodología implementada entre 2015-2018 incluyó: trabajo de campo para la inspección de la planta de tratamiento y evaluación de la operación y mantenimiento de las instalaciones, campañas de muestreos para determinar la eficiencia de remoción de contaminantes, entrevistas con directivos y operadores para la recolección de información con respecto a la población servida y el tipo de gestión de las plantas de tratamiento. Los resultados mostraron que el puntaje de actividades de operación y mantenimiento está relacionado con las eficiencias de tratamiento en los parámetros de DBO y DQO en las plantas estudiadas.

Palabras clave: Agua residual doméstica, tratamiento, Cochabamba, eficiencia, gestión, plantas de tratamiento de agua residual

Abstract. Management of small wastewater treatment plants in Bolivia (2000 – 10000 inhab.) Is deficient, which drives wastewater treatment plants to not fulfill their goal of reducing pollution in receiving water bodies, contributing to deterioration of water quality.

The goal of the present study is to find a link between efficiency of small wastewater treatment plants and activities of operation and maintenance.

Diagnostics of five , one in urban area and four in rural areas, wastewater treatment plants were performed considering: types of treatment technologies, efficiency regarding water quality (total suspended solids, Biological Oxygen Demand, Chemical Oxygen Demand and Thermotolerant Coliforms.), and type of Operation and Maintenance. Methodology included a period between 2015 and 2018 and activities of: sanitary surveys at wastewater treatment plants, sampling campaigns and interviews with boards, operators and users. Main results presented a link between rank of operation and maintenance and efficiency in BOD and COD.

Keywords: Domestic wastewater, wastewater treatment, efficiency, management, Cochabamba.

1. Introducción

Un estudio del año 2013 sobre 105 plantas de tratamiento de aguas residuales con destino de reúso de aguas tratadas en Bolivia (MMAyA 2013) indica que la operación y mantenimiento es el principal problema que se presenta en las PTAR estudiadas. Otro estudio, inventariando 219 plantas de tratamiento de aguas residuales en Bolivia para poblaciones mayores de 1000 habitantes (Salinas 2018) encontró que 88% de las plantas visitadas no realizan actividades de mantenimiento preventivo, asumiendo que eso también incluye a las plantas de tratamiento.

Esto se debe, principalmente, a la falta de recursos económicos y personal capacitado con los conocimientos necesarios para operar y mantener los diferentes tipos de tratamiento de aguas residuales. Este problema se refleja en los bajos niveles de remoción de los contaminantes y sistemas de tratamiento sin funcionar.

La falta de recursos económicos y también la falta de capacidad técnica para operar y mantener las plantas de tratamiento pueden ser indicadores de una falta de sostenibilidad de las mismas, tal como indica la Guía Técnica de Diseño y Saneamiento Proyectos de Agua Ejecución de con Tecnologías Alternativas (MMAyA 2010)

En el Departamento de Cochabamba, existen plantas de tratamiento de aguas residuales en varias ciudades intermedias que también presentan los problemas descritos por el estudio del Ministerio de Agua y Medio Ambiente del año 2013.

2. Planteamiento del problema de investigación

Un estudio reciente vinculo la operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de agua residual a riesgos en la salud debido al uso agrícola del agua residual tratada, indicando entre otras conclusiones que los riesgos microbiológicos existentes en el uso de efluentes de las plantas estudiadas podrían ser reducidos optimizando la Operación y mantenimiento de las mismas; además las actividades de Operación, Mantenimiento y monitoreo de las plantas de tratamiento deberían ser cuidadosamente consideradas en la etapa de planificación de la implementación de las plantas de tratamiento. (Cossio et al. 2019)

Basados en los estudios anteriores, y en conocimiento de que existen varias plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas, que se cree que tienen deficiencias en aspectos de operación y mantenimiento, es posible creer que existe una relación entre la eficiencia de las plantas de tratamiento y sus actividades de operación y mantenimiento; conclusiones derivadas de esta relación podrían ayudar a fomentar un manejo más adecuado de las instalaciones a estudiar.

En el presente caso se toma una planta de tratamiento del ámbito urbano para compararla con otras de un ámbito más cercano a ambientes rurales.

3. Objetivos

Realizar una revisión bibliográfica, inspecciones y toma de muestras a 5 plantas de tratamiento de aguas residuales: Colomi, El Paso, Tarata, Ucureña y San Pedro Magisterio, en el departamento de Cochabamba, de manera de ver si existe una relación entre la eficiencia de remoción de contaminantes y el tipo de operación y mantenimiento realizado a estas.

4. Sustento teórico

El propósito principal del tratamiento del agua residual es remover el material contaminante, orgánico e inorgánico, el cual puede estar en forma de partículas en suspensión y/o disueltas, con objeto de alcanzar una calidad de agua requerida por la normativa de descarga o por el tipo de reutilización a la que se destinará (Noyola 2013).

Uno de los factores de sostenibilidad técnica de instalaciones de saneamiento, como las plantas de tratamiento de agua residual, tiene que ver con la simplicidad de la tecnología de tratamiento y su facilidad de Operación y Mantenimiento (MMAyA 2010).

Por otro lado, en la elección de tecnologías de tratamiento de aguas residuales, se recomienda favorecer aquellas tecnologías que no demanden una alta

especialización para su arranque y operación y en el caso de requerirse, asegurar su permanencia en el empleo de este personal clave.(Noyola 2013).

El agua residual se caracteriza en términos de su composición física, química y bacteriológica. Algunos de los contaminantes de importancia en este tipo de aguas se encuentran en la tabla siguiente.

Tabla 1. Contaminantes de importancia en el tratamiento de aguas residuales. Extraído de Tchobanoglus 1991

Contaminantes	Razón de la importancia
Sólidos suspendidos	Los sólidos suspendidos pueden llevar al desarrollo de depósitos de lodos y condiciones anaerobias cuando agua residual sin tratar es descargada en el ambiente acuático,
Compuestos orgánicos biodegradables	Compuestos principalmente por proteínas, carbohidratos y grasas, los compuestos orgánicos biodegradables son medidos comúnmente en términos de DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno) y DQO (Demanda química de Oxígeno, Si son descargados sin tratar al ambiente, su estabilización biológica puede llevar al término de oxígeno naturalmente existente en el agua y al desarrollo de condiciones sépticas,
Patógenos	Enfermedades relacionadas con el agua pueden ser transmitidas por organismos patógenos de las aguas residuales
Nutrientes	El nitrógeno y el fósforo, junto con el carbón, son nutrientes esenciales para el crecimiento, Cuando se descargan al ambiente acuático, estos nutrientes pueden llevar al crecimiento de vida acuática indeseable, Cuando se descargan en cantidades excesivas al suelo, también pueden llevar a la contaminación del agua subterránea,

Las características de un agua residual doméstica, varían con la hora y el caudal a dicha hora, debido a eso se prefiere tomar, cuando se puede, muestras compuestas y en otras ocasiones, muestras simples. Las muestras simples son tomadas en un lugar específico en un tiempo corto (del orden de minutos o segundos). Las muestras compuestas deberían proveer un muestra más representativa de matrices

heterogéneas en las que las concentraciones de los analitos de interés varían en periodos cortos de tiempo o espacio (caudal variable). (Greenberg y Eaton 1999)

De acuerdo al estudio del año 2018 (Salinas 2018) realizado en 219 plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas para poblaciones mayores a 1.000 habitantes en Bolivia, entre las plantas que no presentan un buen estado de funcionamiento (171 de 219), existen diversas razones detectadas que han afectado el buen funcionamiento de las mismas. La razón principal detectada en 49 PTAR es la falta de una adecuada O&M, carencia que en muchos casos ha llevado a la segunda causa de problemas detectados (47 PTAR) que es la colmatación (ya sea por basuras o lodos), las cuales representan además la gran mayoría de plantas que no funcionan o funcionan sobrecargadas y con una muy baja eficiencia.

5. Metodología

Se realizaron inspecciones a las plantas de tratamiento estudiadas entre el año 2012 y 2017 en diferentes periodos. Se realizó la toma de muestra de aguas residuales de los afluentes y efluentes de las plantas de tratamiento.

Los análisis de calidad del agua fueron realizados en el Centro de Aguas y Saneamiento Ambiental, siguiendo los protocolos de APHA (Greenberg y Eaton 1999). Estas fueron tomadas también considerando una inspección sanitaria incorporada en el protocolo de muestreo.

La medición de caudales en todos los casos se la realizó con el método volumétrico, aunque la mayoría de los caudales reportados fueron sacados como promedio de muestreos compuestos realizados.

Las inspecciones sanitarias consideraron los componentes de las plantas de tratamiento, la medición de caudales de afluentes y efluentes en los periodos de medición de calidad del agua, así como el estado general de la planta de tratamiento. También se vio la disposición final de los efluentes de las plantas.

Por otro lado, en entrevistas y reuniones con los responsables de la operación de las plantas de tratamiento, se obtuvo información adicional como ser el tipo de operación y mantenimiento de las plantas y el personal disponible para su funcionamiento, además de conocer la calidad del cuerpo receptor de los efluentes de la planta de tratamiento.

Los datos para la población de Tiraque fueron tomados entre febrero y diciembre del año 2014 (Jala 2016).

Los datos para la población de El Paso, Ucureña y Tarata fueron tomados el año 2017 y 2018 por el Centro de Aguas y Saneamiento Ambiental (Cossio et al. 2019).

Los datos de la planta de tratamiento de San Pedro Magisterio fueron tomados por el Centro de Aguas y Saneamiento Ambiental entre los años 2016 y 2018 (Copa Mitma 2019).

Debido a la gran cantidad de datos existentes solo se tomaron promedios de los resultados de afluente y efluente de las plantas de tratamiento en los parámetros de Demanda Biológica de Oxígeno, Demanda Química de Oxígeno, Sólidos Totales Disueltos, Nitratos, Fósforo total, Nitrógeno orgánico total y Coliformes termotolerantes y cuando existieran: Colifagos, Nitrógeno Amónico y Fosfatos. Los efluentes fueron comparados con los valores establecidos en el Anexo A-2 del Reglamento en materia de Contaminación Hídrica de la Ley 1333 (Bolivia 1993)

Los componentes de las plantas de tratamiento fueron abreviados de la siguiente manera.

Tabla 2. Abreviaciones de los componentes de las plantas de tratamiento estudiadas

Proceso	Abreviación
Rejas	Re
Desarenador	Des
lagunas anaerobias	La
lagunas facultativas	Lf
lagunas de maduración	Lm
Tanques Imhoff	Imhoff
Tanque de almacenamiento	Ta
Reactor UASB	UASB
Filtros biológicos	Fb
Humedales	Hum
Filtros anaerobios	Fa

Se consideraron cinco criterios de operación y mantenimiento: a) Nivel existente y disponibilidad de experticia técnica, respecto al operador y a un personal de asistencia técnica que pueda existir para apoyar a la planta de tratamiento, b) Actividades y frecuencia de Operación y Mantenimiento en el pre tratamiento y en los procesos principales, c) Actividades de mantenimiento a largo plazo, y d) el monitoreo de calidad de agua. Todos estos criterios fueron evaluados en una escala de 0 a 2 para cada planta de tratamiento.

6. Resultados y discusión

Las plantas de tratamiento se encuentran en el valle bajo de Cochabamba (La Planta del Paso), en el valle alto (las plantas de Ucareña, Tarata y Tiraque), y en el entorno urbano de la ciudad de Cochabamba (San Pedro Magisterio).

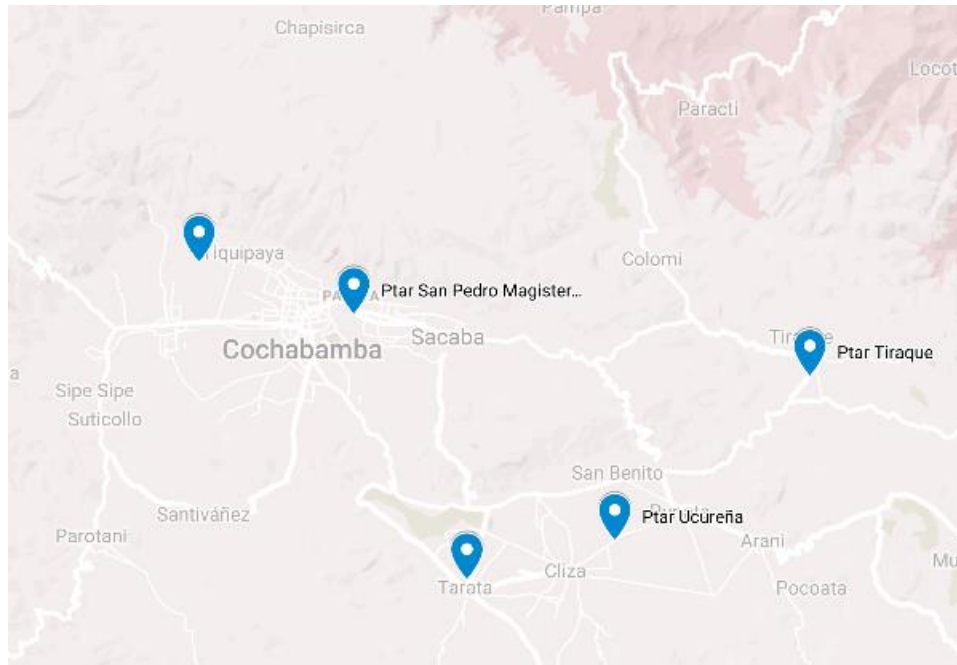


Figura 1: Esquema de ubicación de las plantas de tratamiento estudiadas

Los componentes principales de las plantas se pueden dividir básicamente en tres grupos Tanques Imhoff, Reactores UASB, y lagunas de estabilización.

Tabla 3. Componentes de las distintas plantas de tratamiento

EL PASO	TIRAQUE	TARATA	UCUREÑA	SAN PEDRO MAGISTERIO
Re	Des	Des	Re	Re
Des	Re	Re	Ta	Des
UASB	Imhoff	La	Imhoff	UASB
Fb	Fa	Lf		Hum
Lm		Lm		

El destino de los efluentes de las plantas se puede dividir principalmente entre los que se destinan a riego directo, y los que llegan a ríos. Los efluentes de las plantas de Tarata y Ucureña se usan en riego. Los efluentes de la planta de tratamiento de Tiraque, llegan al Río Tiraque, que se une al Río Toralapa, que posteriormente desemboca en el Abanico de Punata, el efluente de la planta de San Pedro Magisterio termina en el río Rocha, el efluente de la planta de El Paso, termina en un canal que se infiltra en el suelo, sin uso aparente para riego o cuerpo receptor

Tabla 4. Características de las plantas de tratamiento estudiadas

Planta de tratamiento	Destino del efluente	Organización a cargo de la operación	Personal en la planta	Caudal medio $m^3 d^{-1}$
El Paso	Riego	Asociación de usuarios del Paso	1 Permanente	124
Tiraque	Río Tiraque	Asociación de Usuarios		596*
Tarata	Riego	Servicio de Agua Potable		264
Ucureña	Riego	Asociación de Usuarios		149
San Pedro Magisterio	Río Rocha	Cooperativa de agua potable	1 Permanente	94*

*Se refiere a que el caudal fue medido solo en un muestreo puntual, mientras los otros son resultados de mediciones de muestreo compuesto

De acuerdo al tipo de organización encargada de la operación se tienen tres tipos de organizaciones: asociaciones de usuarios y una cooperativa. También es importante recalcar que no todas las plantas tienen una persona permanente

Se debe destacar que las asociaciones de usuarios son independientes del municipio, sus fondos económicos dependen del aporte de los usuarios; en el caso de las asociaciones de usuarios, la directiva y temas relacionados al manejo de la planta son decididos con participación de usuarios. Muchas veces, dependiendo de la capacidad de pago de los usuarios, se puede tener a una persona encargada de la planta de tratamiento, que en general no tiene la formación académica necesaria.

La calidad de afluentes y efluentes mostrada en la Tabla 5 indica entre otras cosas:

La DBO se reduce en todas las plantas de tratamiento, aunque no en todas entra en norma en el efluente. Las plantas de tratamiento que mayor reducción porcentual de DBO presentan son las de Tarata, El Paso y San Pedro Magisterio, siendo la reducción más grande visible la de la planta de tratamiento de Tarata, probablemente debido al sistema de lagunas que es muy robusto con respecto a la necesidad de operación, no requiere de personal altamente capacitado (Wagner 2010). Por otro lado, las plantas de tratamiento que tienen tanques Imhoff como principales procesos no presentan una reducción significativa del parámetro.

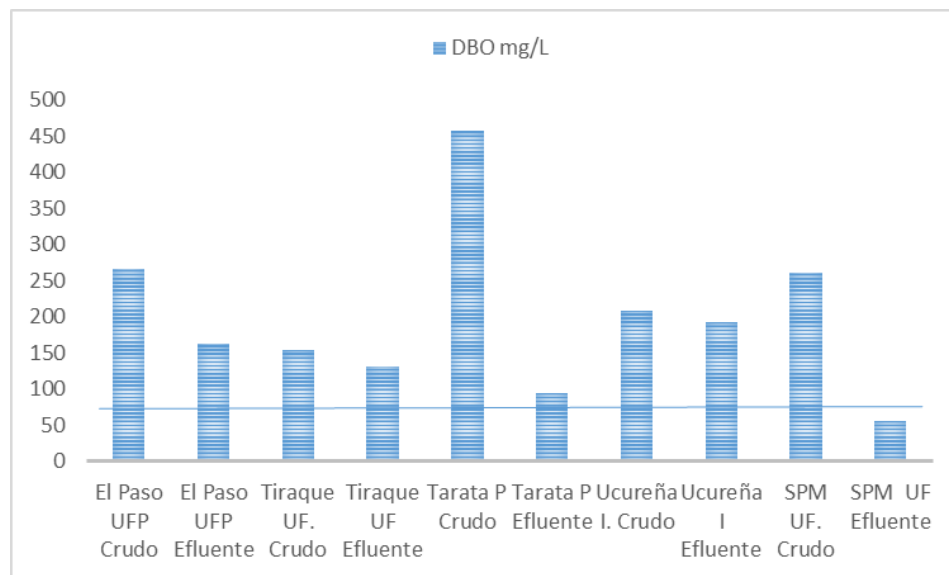


Figura 2: Remoción de DBO en las distintas plantas de tratamiento.

De acuerdo a los análisis de calidad del agua, la DQO se reduce en cuatro de las cinco plantas de tratamiento estudiadas, a excepción de la planta de Tiraque. La planta donde es menos notoria la reducción de DQO es la de Ucuireña. Las plantas de tratamiento de El Paso, San Pedro Magisterio y Tarata son las que más reducción porcentual de DQO presentan, en las dos primeras, existe un reactor UASB, mientras que en Tarata, la reducción es lograda por las lagunas. Por otro lado, se tienen valores elevados de DQO en las plantas de El Paso y Tarata, alrededor de 600 mg O₂/L, posiblemente debido al ingreso de aguas industriales a sus redes de alcantarillado.

Con respecto a la concentración de sólidos suspendidos, los afluentes que mayor valor presentan son los provenientes de Ucuireña y El Paso, y las mayores reducciones porcentuales se dan en las plantas de tratamiento de El Paso, Ucuireña, Tarata y San Pedro Magisterio.

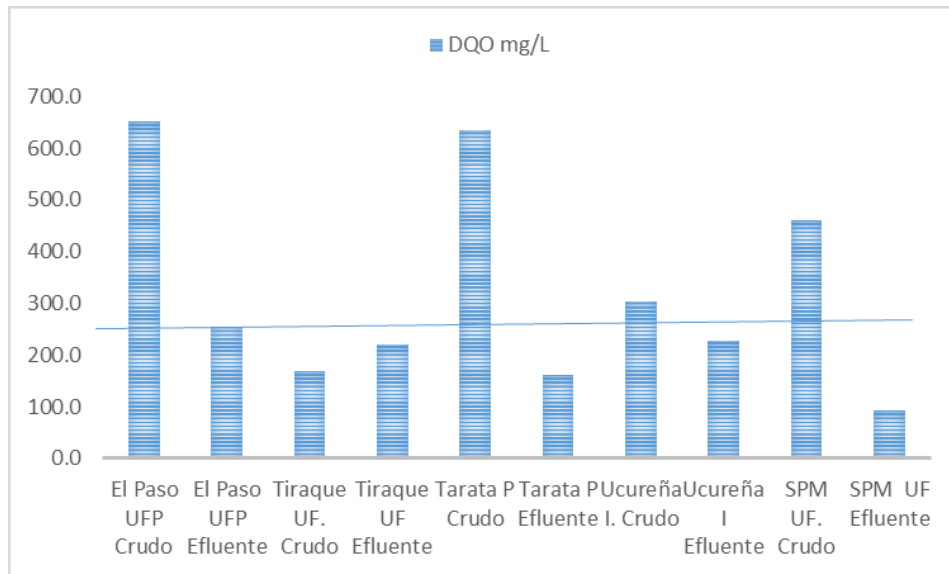


Figura 3: Remoción de DQO en las distintas plantas de tratamiento.

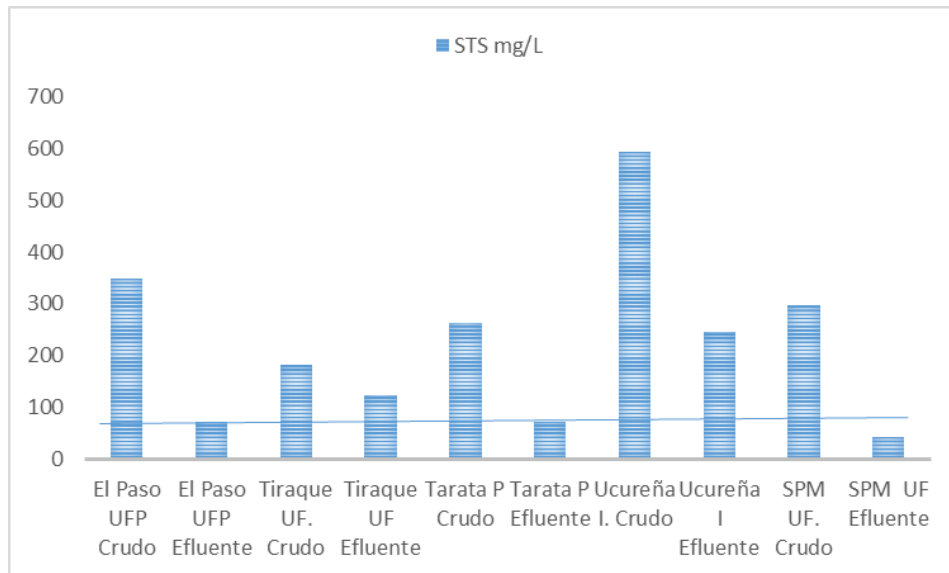


Figura 4: Remoción de solidos totales suspendidos en las distintas plantas de tratamiento.

Ninguna de las plantas de tratamiento alcanza a tener la concentración normada de coliformes termotolerantes en el efluente que es 1.000 ufc/100 ml. La que mayor reducción posee es la planta de tratamiento de aguas residuales de Tarata, debido al

sistema lagunar que aprovecha de la radiación solar, la siguiente planta con mayor reducción es la de El Paso, probablemente porque también tiene una laguna de maduración al final del tratamiento. La planta de Ucureña también presenta una remoción apreciable, probablemente debido a que los microorganismos están adheridos a los sólidos suspendidos que también tienen alguna remoción, las otras plantas de tratamiento no presentan remociones significativas de coliformes termotolerantes.

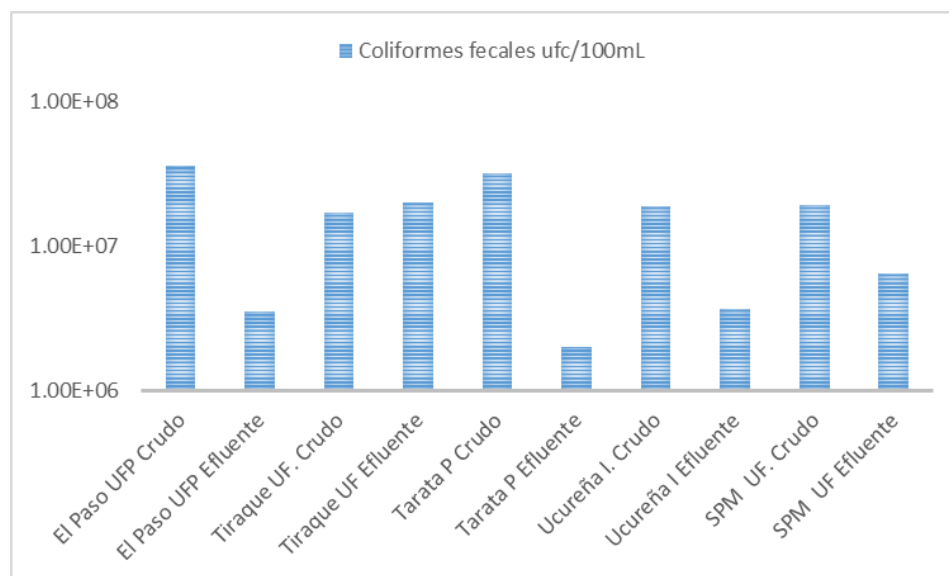


Figura 5: Remoción de coliformes termotolerantes en las plantas de tratamiento.

La remoción de fósforo total es más notoria en la planta de San Pedro magisterio, probablemente debido a la existencia de humedales existentes en el último proceso de tratamiento, las otras plantas de tratamiento no presentan una remoción apreciable.

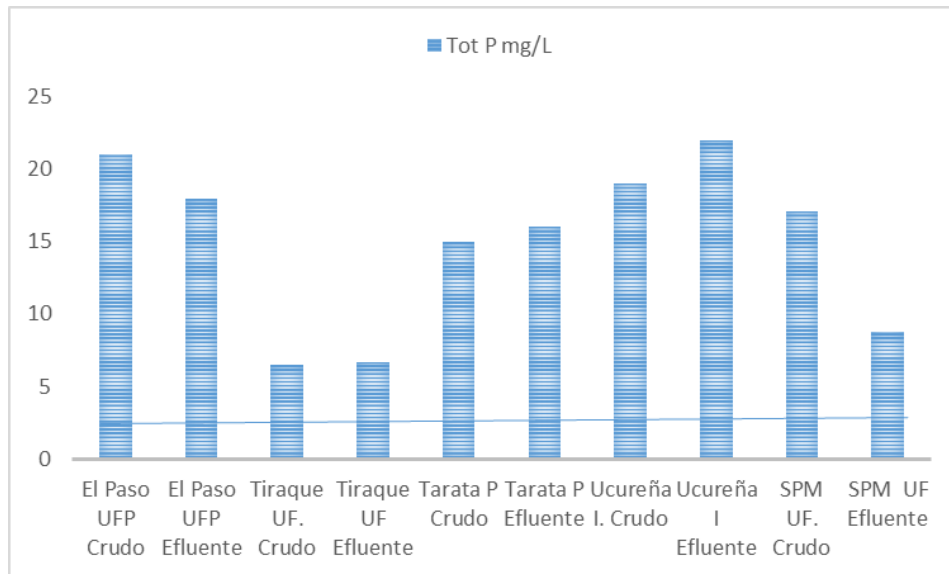


Figura 6: Remoción de fosforo total

Los resultados resumidos de las plantas de tratamiento se encuentran en la siguiente tabla, donde se encuentran en color rojo, los parámetros de los efluentes fuera de la norma, y en verde, los que se encuentran dentro o muy cerca de la norma

Los criterios de operación y mantenimiento considerados, en ninguna de las plantas de tratamiento estudiadas fueron completamente satisfechos. Ninguna de las plantas de tratamiento lleva un monitoreo regular de la calidad de sus efluentes. Las plantas de tratamiento de Ucureña y de Tarata no cumplen con ninguno de los criterios evaluados.

Con respecto al nivel existente de los operadores y la disponibilidad de asistencia técnica, solamente la planta de tratamiento de San Pedro Magisterio cuenta con un operador permanente y asistencia técnica semanal por parte de un ingeniero con experiencia en la temática; la planta de El Paso cuenta con un operador permanente, pero con asistencia técnica solo en casos de emergencia. Las otras plantas de tratamiento no tienen personal permanente.

Tabla 5. Resultados de algunos parámetros de calidad del agua de las plantas estudiadas. En color rojo los valores fuera de la norma.

Origen	Colifagos ufp/100mL	Coliformes fecales ufc/100mL	Tot N mgL ⁻¹	N-NH ₄ mgL ⁻¹	NO ₃ mgL ⁻¹	Tot P mgL ⁻¹	P-PO ₄ mgL ⁻¹	DQO mgL ⁻¹	DBO mgL ⁻¹	STS mgL ⁻¹
El Paso UFP Crudo	4,40E+03	3,60E+07	123	109	0,17	21	12	653,0	266	348
El Paso UFP Efluente	7,90E+03	3,50E+06	128	117	0,04	18	11	254,0	163	71
Tiraque UF, Crudo		1,71E+07	26,35			6		167,5	154	181
Tiraque UF Efluente		2,00E+07	26,8			7		219,8	132	122
Tarata P Crudo	9,81E+03	3,20E+07	55	47	0,05	15	9	635,0	457	263
Tarata P Efluente	2,00E+04	2,00E+06	70	60	0,05	16	12	161,0	95	71
Ucureña I, Crudo	5,80E+04	1,90E+07	84	75	0,06	19	12	303,0	208	594
Ucureña I Efluente	1,90E+04	3,70E+06	88	84	0,04	22	15	227,0	193	245
SPM UF, Crudo		1,95E+07			0,08	17		460,0	261	298
SPM UF Efluente		6,53E+06			3,83	9		91,5	56	41

Tabla 6. Criterios de operación y mantenimiento aplicados a las plantas de tratamiento

Planta	Nivel existente y disponibilidad de experticia técnica	Puntaje	Actividades y frecuencia de O y M en el pre tratamiento	Puntaje	Actividades de O y M en las unidades de proceso	Puntaje	Actividades de mantenimiento a largo plazo	Puntaje	Monitoreo existente	Puntaje	Total
El Paso	Operador en la planta, Ingeniero con experiencia en plantas de tratamiento de agua residual acude en caso de emergencias,	1	Remoción diaria de la arena del desarenador, No hay desgrasador	1	El biofiltro se limpia cuando hay colmatación, Limpieza de la superficie de la laguna	1	Remoción de los lodos del reactor cada 3 a 4 meses, Trabajos preventivos, Disposición de lodos secos, Se mueve la piedra del biofiltro para evitar zonas muertas,	2	No hay monitoreo automático, La toma de muestras fisicoquímicas y microbiológicas se realiza cada año	0	5
Tiraque	Sin operador en el lugar, solo plomeros en caso de emergencia, No existe asistencia técnica en emergencias	0	Remoción semanal de solidos de las rejas, así como del desarenador,	1	Solo se hace limpieza de los tanques Imhoff cuando hay mal olor o rebalse	0	Solo se retira el lodo del tanque Imhoff una vez al año	0	No hay monitoreo automático, Se muestrea una vez al año	0	1

Tarata	No hay operador en la planta, solo los plomeros ayudan en casos de emergencia, No hay disponibilidad de asistencia técnica	0	El pretratamiento el limpiado en casos de emergencia cuando se colmata	0	Ninguna	0	Ninguna	0	No hay monitoreo automático, La toma de muestras fisicoquímicas y microbiológicas se realiza cada año aproximadamente	0	0
Ucureña	No hay operador en la planta, solo los plomeros ayudan en casos de emergencia, No hay disponibilidad de asistencia técnica	0	Se limpian las barras cuando se colmatan, No hay desarenador, No hay desgrasador	0	Revisa dos veces por semana si la bomba funciona automáticamente, en caso negativo bombea manualmente hacia el tanque Imhoff una vez al día,	0	Mantenimiento de la bomba cuando se daña	0	No hay monitoreo automático y no se realiza muestreo,	0	0
San Pedro magisterio	Existe operador permanente y existe asistencia técnica semanal por parte de un ingeniero	2	Remoción diaria de solidos de las rejas, y semanal del desarenador, No existe cámara de grasas	1	Retira diariamente flotantes del reactor, Mantenimiento semanal de ingreso a humedal, Humedal colmatado frecuentemente	1	Extracción de lodos cada 6 meses, Humedal poco mantenido	1	No hay monitoreo automático, Se muestrea una vez al año	0	5

A partir de los resultados anteriores se vinculó los resultados de los parámetros de remoción de materia orgánica y los de los criterios de operación y mantenimiento en la siguiente tabla y gráfica. En la tabla se puede notar que las plantas que mayor puntaje en operación y mantenimiento tienen son las del Paso y la de San Pedro Magisterio, siendo esta última la que mayor eficiencia en DBO y DQO presenta. La planta de tratamiento de Tarata también presenta elevadas eficiencias entre 70 y 80%, aunque su indicador de operación y mantenimiento es pésimo.

Es posible que las eficiencias de las plantas de tratamiento de El Paso y San Pedro Magisterio estén vinculadas a la operación y mantenimiento ya que la tecnología de reactores, filtros biológicos y humedales requieren de un mantenimiento mínimo para no colapsar.

Por otro lado, las plantas de Tiraque y Ucureña, están conformadas básicamente por un tanque Imhoff que no tiene mucha capacidad de remoción de componentes orgánicos, y esto junto a una baja operación y mantenimiento muestran eficiencias relativamente bajas.

La Planta de Tarata tiene carencias en la operación y mantenimiento, sin embargo, su eficiencia puede deberse a la robustez del sistema de lagunas, que aun con escasa operación y mantenimiento puede funcionar.

Tabla 7. Relación entre eficiencias en remoción de materia orgánica y criterios de operación y mantenimiento de las plantas estudiadas

Planta	Puntaje en operación	Eficiencias porcentuales		Reducciones absolutas	
		DQO %	DBO %	DQO mg O ₂ L ⁻¹	DBO mg O ₂ L ⁻¹
El Paso	5	61	39	399	103
Tiraque	1	-31	14	-52,25	22
Tarata	0	75	79	474	362
Ucureña	0	25	7	76	15
San Pedro magisterio	5	80	79	368,5	205,25

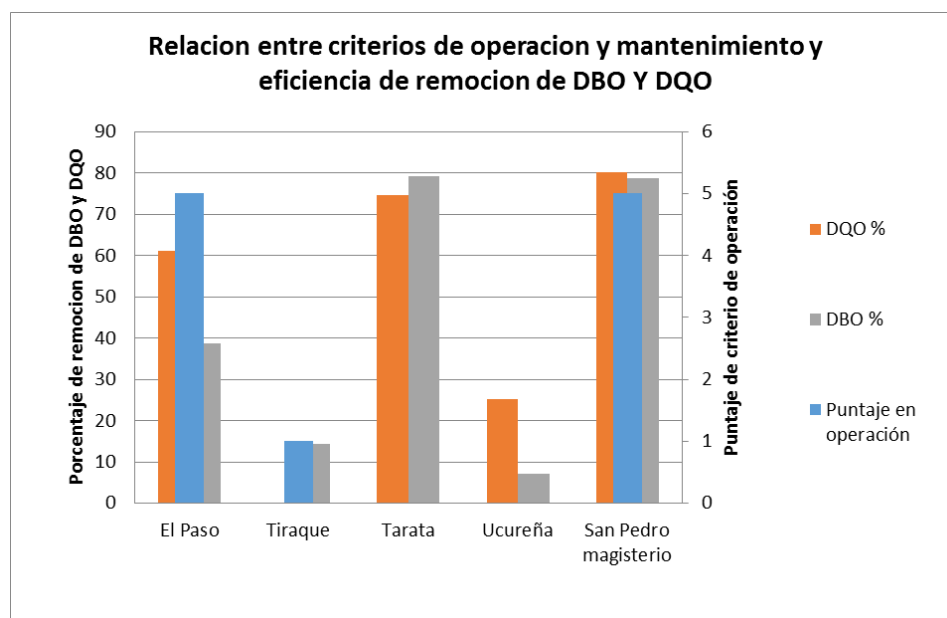


Figura 7: Relación entre criterios de operación y mantenimiento y eficiencia de remoción de DBO y DQO

Las plantas de tratamiento que tienen etapa anaerobia y aerobia, son las que más se acercan a los límites permisibles de descarga, sin que lleguen a cumplirlos en este estudio. Es el caso de las plantas de El Paso y de San Pedro Magisterio

Todos los sistemas de tratamiento evaluados llegan a cumplir con el valor de descarga de DQO con concentraciones menores a 250 mg O₂/L

La Única planta que llega a cumplir con la remoción de DBO, DQO y Solidos suspendidos totales es la de San Pedro Magisterio.

La calidad del agua del afluente de las poblaciones de El Paso y Tarata está fuertemente influenciada por descargas aparentemente industriales, lo que hace tengan eficiencias reducidas, ya que ambas poblaciones reciben aguas de procesos industriales a pequeña escala como ser industrias alimenticias, y estas industrias no tratan previamente sus efluentes antes de enviarlos a la red de alcantarillado.

Las eficiencias de tratamiento de las poblaciones de Tiraque y Ucureña son las más bajas de todas, probablemente debido a la tecnología utilizada que son tanques Imhoff, y además debido a la falta de operadores y actividades de operación.

Ninguna de las plantas de tratamiento cumple con todos los parámetros de operación y mantenimiento considerados: disponibilidad de experticia técnica,

operación y Mantenimiento en el pre tratamiento y unidades de proceso, mantenimiento a largo plazo y monitoreo regular.

Ninguna de las plantas de tratamiento tiene un monitoreo regular.

La planta de tratamiento del Paso es la que cumple con la escala adecuada de mantenimiento a largo plazo.

La Planta de San Pedro magisterio es la que cumple con la existencia de un operador y asistencia técnica permanente.

Las plantas de tratamiento con un operador permanente cumplen parcialmente los requerimientos de operación y mantenimiento considerados en este estudio

7. Conclusiones

La eficiencia en el tratamiento de aguas residuales, en las plantas estudiadas, está influenciada por el tipo de tecnología, la calidad del afluente y el tipo de operación y mantenimiento, directamente relacionadas a la gestión de las plantas de tratamiento.

La relación entre eficiencia de parámetros principales como ser la DBO y la DQO con los criterios de operación y mantenimiento, mostrados en este estudio, muestra una dependencia directa, indicando que a mayor eficiencia se ha obtenido mayores puntajes de operación y mantenimiento con las plantas estudiadas.

La falta de monitoreo permanente dificulta la toma de decisiones de mejora en los tratamientos.

El ingreso de aguas industriales, probablemente perjudica los procesos de tratamiento, ya que disminuye las eficiencias teóricas de las plantas de tratamiento.

Las plantas de tratamiento con menor operación y mantenimiento también son las que menor eficiencia presentan, tal es el caso de las plantas de Ucureña y Tiraque, que son las plantas con menores puntuaciones de los Criterios de operación y mantenimiento aplicados.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la cooperación sueca, que mediante el proyecto GIRH-ASDI-UMSS financio parte de las actividades involucradas en este artículo.

Agradecimientos también a la Cooperativa de Agua San Pedro Magisterio, y al Comité de Agua del Paso, que permitieron las actividades en sus instalaciones.

Referencias bibliográficas

- [1] BOLIVIA, C.N., 1993. *Ley del Medio Ambiente*. 1993. BOLIVIA: GACETA OFICIAL DE BOLIVIA.
- [2] COPA MITMA, M., 2019. *EVALUACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS DE LA URBANIZACIÓN SAN PEDRO MAGISTERIO Proyecto de Grado, Presentado Para Optar al Diploma Académico de Licenciatura en Ingeniería Química*. S.l.: San Simon.
- [3] COSSIO, C., PEREZ-MERCADO, L.F., NORRMAN, J., DALAHMEH, S., VINNERÁS, B., MERCADO, A. y MCCONVILLE, J., 2019. Impact of treatment plant management on human health and ecological risks from wastewater irrigation in developing countries – case studies from Cochabamba, Bolivia. *International Journal of Environmental Health Research*, pp. 1-19. ISSN 0960-3123. DOI 10.1080/09603123.2019.1657075.
- [4] GREENBERG, A.E. y EATON, A.D. (eds), 1999. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 20. S.l.: APHA, AWWA, WEF.
- [5] JALA, J., 2016. *Evaluación de las plantas de tratamiento de aguas residuales de Tiraque y propuesta de alternativas de mejora en el diseño y operación*. S.l.: Universidad Mayor de San Simon, Cochabamba, Bolivia.
- [6] MMAYA, 2010. *Guía Técnica de Diseño y ejecución de proyectos de agua y saneamiento con tecnologías alternativas*. La Paz: s.n.
- [7] MMAYA, 2013. *Sistematización sobre tratamiento y reúso de aguas residuales*. PROAGRO. La Paz: s.n. ISBN 978 - 99974 - 807 - 2 - 9.
- [8] NOYOLA, A., 2013. *Selección de tratamientos para aguas residuales municipales*. Mexico: s.n.
- [9] SALINAS, A., 2018. *SISTEMATIZACIÓN DEL INVENTARIO NACIONAL DE PTAR EN BOLIVIA*. 1. La Paz: s.n.
- [10] WAGNER, W., 2010. *Recomendaciones para la elección de plantas de tratamiento de agua residual aptas para Bolivia*. La Paz: GIZ.