

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



**Evaluación en la disminución de la carga orgánica de aguas
residuales domesticas en reactores aerobios mediante colectores
solares en condiciones altoandinas**

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Autor:

Raquel Calcina Mamani

Yasmin Moreno Cusi

Asesor:

Mg. Juan Eduardo Vigo Rivera

Juliaca, noviembre de 2022

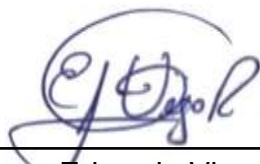
DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD DE TESIS

Yo Ing. Juan Eduardo Vigo Rivera, docente de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: **“EVALUACIÓN EN LA DISMINUCIÓN DE LA CARGA ORGÁNICA DE AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS EN REACTORES AEROBIOS MEDIANTE COLECTORES SOLARES EN CONDICIONES ALTOANDINAS”** de los autores **Raquel Calcina Mamani** y **Yasmin moreno Cusi** tiene un índice de similitud de 5% verificable en el informe del programa Turnitin, y fue realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponde ante cualquier falsedad u omisión de los documentos como de la información aportada, firmo la presente declaración en la ciudad de Juliaca, a los 18 días del mes de Noviembre del año 2022.



Ing. Juan Eduardo Vigo Rivera

Asesor



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En Puno, Juliaca, Villa Chullunquiari, a 08 día(s) del mes de noviembre del año 2022, siendo las 5:00 horas, se reunieron en el Salón de Grados y Títulos de la Universidad Peruana Unión, Filial Juliaca, bajo la dirección del Señor Presidente del jurado: Ing. Nancy Gurasí Rafael, el secretario: Msc. Rosa Adeline Gallata Lihora y los demás miembros: Dr. Mateo Alejandro Salinas Mena y el asesor Msc. Juan Eduardo Vigo Rivera

con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulada: Evaluación en la disminución de la carga orgánica de aguas residuales domésticas en reactores aerobios mediante colectores solares en condiciones altandinas

de el(los)/a(las) bachiller(es): a) Raquel Galina Mamani b) Yasmín Moreno Lusi conducente a la obtención del título profesional de Ingeniero Ambiental (Nombre del Título Profesional)

con mención en.....

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (los)/a(la)(las) candidato(a)s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por el(los)/a(la)(las) candidato(a)s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Candidato (a): Raquel Galina Mamani

Table with 5 columns: CALIFICACIÓN, ESCALAS (Vigesimal, Literal, Cualitativa), and Mérito. Row 1: Aprobado, 16, B, Bueno, Muy Bueno

Candidato (b): Yasmín Moreno Lusi

Table with 5 columns: CALIFICACIÓN, ESCALAS (Vigesimal, Literal, Cualitativa), and Mérito. Row 1: Aprobado, 16, B, Bueno, Muy Bueno

(*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al(los)/a(la)(las) candidato(a)s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

Signatures of Presidente, Asesor, and Candidato/a (a)

Signature of Miembro

Signatures of Secretario, Miembro, and Candidato/a (b)

Evaluación en la disminución de la carga orgánica de aguas residuales domesticas en reactores aerobios mediante colectores solares en condiciones altoandinas

Resumen

Frente al problema de aguas residuales y la existente oferta de energía solar en zonas altonadinas, se torna imperativa la integración de ambos en sistemas de tratamiento de aguas residuales. El objetivo de la investigación es evaluar la disminución de carga orgánica en aguas residuales domesticas tratadas en 6 reactores aerobios tipo bach (3 control + 3 experimentales), que tienen calentamiento con colectores solares de bajo costo en condiciones altoandinas. Se monitoreo *in situ* el pH, CE, OD cada 3 días; y la DBO₅, DQO, SST y Turbiedad cada 7 días. Las temperaturas del sistema experimental se monitorearon en plataforma Arduino las 24 horas del día, durante 35 días. El agua residual a tratar tuvo un pH de 7.33, 1015 $\mu\text{S}/\text{cm}$ de CE; y 203, 434.8, 98 y 0.84 mg/L de DBO₅, DQO, SST y OD, respectivamente. La ratio DBO₅/DQO fue 0.46, que indica un agua residual poco biodegradable. La remoción de carga orgánica fue menor (74.8 y 73.5% para la DBO₅ y DQO) en los tratamientos sin calentamiento solar; sin embargo, la remoción de carga orgánica fue superior en los tratamientos con calentamiento solar (87.9 y 80.7% para DBO₅ y DQO). La energía acumulada empleando colectores solares fue de 993.3 kW-h en los reactores con calentamiento solar. Los datos demuestran que hay una mayor disminución de carga orgánica en los sistemas con influencia de colectores solares. Logrando el cumplimiento del marco normativo nacional e internacional para la regulación de las aguas residuales domésticas.

Palabras clave: aguas residuales domésticas, carga orgánica, colectores solares, condiciones altoandinas, depuración, reactores aerobios.

Evaluation in the reduction of the organic load of domestic wastewater in aerobic reactors by means of solar collectors in highandean conditions

Abstract

Faced with the problem of wastewater and the existing supply of solar energy in highland areas, the integration of both into wastewater treatment systems becomes imperative. The objective of the research is to evaluate the decrease in organic load in domestic wastewater treated in 6 batch type aerobic reactors (3 control + 3 experimental), which are heated with low-cost solar collectors in high Andean conditions. The pH, EC, and DO were monitored in situ every 3 days; and the BOD₅, COD, TSS and Turbidity every 7 days. The temperatures of the experimental system were monitored on the Arduino platform 24 hours a day, for 35 days. The residual water to be treated had a pH of 7.33, 1015 µS/cm EC; and 203, 434.8, 98 and 0.84 mg/L of BOD₅, COD, TSS and OD, respectively. The ratio BOD₅/COD was 0.46, which indicates a poorly biodegradable wastewater. The removal of organic load was lower (74.8 and 73.5% for BOD₅ and COD) in the treatments without solar heating; however, the removal of organic load was higher in the treatments with solar heating (87.9 and 80.7% for BOD₅ and COD). The accumulated energy using solar collectors was 993.3 kW-h in the solar-heated reactors. The data show that there is a greater decrease in organic load in systems influenced by solar collectors. Achieving compliance with the national and international regulatory framework for the regulation of domestic wastewater.

Keywords: domestic wastewater, organic load, solar collectors, high andean conditions, purification, aerobic reactors.

Introducción

Las aguas residuales y su tratamiento es una prioridad a nivel mundial debido a su incidencia directa sobre la salud humana, así como por su efecto nocivo sobre el ambiente natural al contaminar los depósitos y cuerpos naturales que podrían ser empleados como fuente de abastecimiento en las actividades humanas (Torres-Parra et al., 2017). Según un informe de la UNESCO (2017), la generación de aguas residuales resulta ser uno de los desafíos más relevantes en los asentamientos informales y zonas alejadas de los países en desarrollo.

Hasta el 2017, 2.4000 millones de personas sin acceso a servicios básicos de saneamiento, la agenda 2030 de las Naciones Unidas, incluyó la reducción de esta cifra como objetivo de desarrollo sostenible (ONU, 2022), esto resultará en que el proceso de tratamiento tenga un costo más asequible. Los Países de ingreso medio – bajo, tratan en promedio el 28 % de las aguas residuales que generan, y los Países de ingreso bajo solo el 8 % (WWAP, 2017). En el 2021, en el Perú, el volumen de vertimiento de aguas residuales industriales autorizadas fue de 624 001 727 m³ y el volumen anual de agua residual doméstica fue de 266 633 156 m³ (INEI, 2021). Por otro lado, las 50 Empresas Prestadoras de Servicio de Saneamiento en el Perú que brindan servicio de cobertura cubren un 71% en la población urbana, y el 68.1% en el sector rural, y a nivel de país un total del 69.7 de cobertura, la población no cubierta vierte directamente sus aguas residuales sin tratamiento a cuerpos de agua naturales (SUNASS, 2022).

Esta problemática revela una necesidad en el tratamiento aguas residuales domésticas con el fin de evitar o controlar la contaminación de los recursos hídricos (Torres Andrade, 2014). Existen diversos métodos para el tratamiento del agua, una de las opciones en auge de investigación es el tratamiento mediante fuentes de energía renovable que nos permita reducir inversión y gasto energético (Casas Tapia, 2020). Pero existen procesos que generan energía mediante el aprovechamiento de la radiación solar; y que puede ser aprovechada en el tratamiento de aguas residuales mediante el principio de transformación del agua en el ciclo hidrológico (Gonzales Herrera y Martín Dominguez, 2003) con sistemas de flujo de energía solar y los cambios en la temperatura para cambiar la fase de agua y depurar ciertos contaminantes en su composición (Restrepo et al., 2008).

Por otra parte, la radiación del sol como fuente de energía renovable es muy extendida y posee amplias ventajas económicas y de responsabilidad medioambiental (Gonzales H. et al., 2015). El Atlas de Energía Solar del Perú elaborado por el SENHAMI, señala que el promedio anual de la radiación solar de incidente diaria, es de 5.5 a 6.5 kW-

h/m² en la costa, 4.5 a 5.0 kW-h/m² en la selva y 5.0 a 7.5 kW-h/m² en la sierra; la región Puno, ubicada entre los 3812 y 5500 msnm en la meseta del Collao tiene como promedio anual de energía solar incidente sobre superficie horizontal 6.0 kW-h/m² (SENAMHI, 2003). En el estudio de Quispe Huamán y Sotomayor Alzamora (2022) se estimó un promedio anual de energía incidente solar de 5.9 kW-h/m²/día en la región de Puno, una incidencia mínima en enero con 5.1 kW-h/m²/día y la máxima en octubre con 7.2 kW-h/m²/día estas cifras denotan un alto potencial de energía fotovoltaica.

Las instalaciones para aprovechamiento de la energía solar, basan su funcionamiento en fotoreactores, como paneles, colectores artesanales, dispositivos o instalaciones que puedan conservar la energía (Martínez-Taberner et al., 2007) la energía puede ser consumida a demanda, dependiendo de la disponibilidad de baterías de almacenamiento o incluso haciendo uso de la energía residual (León-Chimbolema et al., 2022), lo que significaría ingreso energético con independencia de la disponibilidad de irradiación solar (Valencia Arias et al., 2011), el interés en el desarrollo de esta tecnología está potencialmente dirigida a localizaciones remotas, para aprovechar la energía solar en los métodos de tratamiento de agua lo que resultaría más viable y económico (Garcés Giraldo et al., 2004).

La investigación en el conocimiento, clasificación y elaboración de metodologías de aprovechamiento de recursos renovables, impulsan el alcance de un doble resultado: La contribución a la mitigación del problema ambiental por aguas residuales y el aprovechamiento de recursos renovables disponibles (OSINERGMIN, 2017); en esta dirección la presente investigación tiene el objetivo de evaluar la remoción carga orgánica de aguas residuales domesticas empleando calentamiento solar mediante colectores de bajo costo en reactores en condiciones altoandinas.

Materiales y métodos

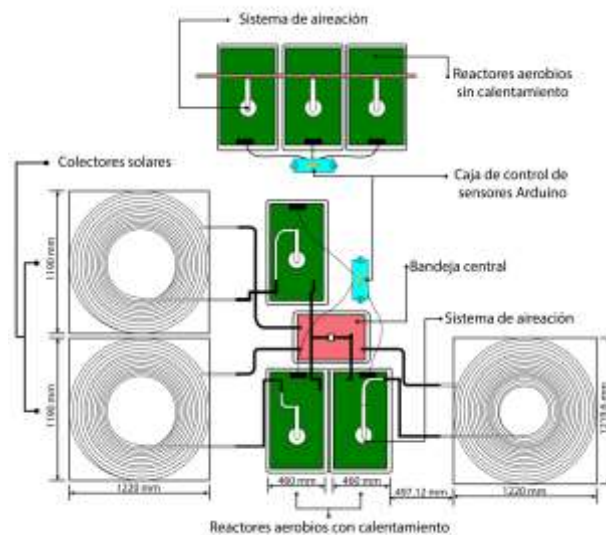
Esta investigación se realizó en el distrito de Juliaca, provincia de San Román (Coordenadas UTM 373158.15 E, 8284151.42 N), en la Región Puno – Perú a 3825 msnm. Para los tratamientos se emplearon 6 reactores (tipo Bach) de capacidad de 115 L, y el tiempo experimental fue de 35 días. Se monitorea *in situ* el oxígeno disuelto (OD), conductividad eléctrica (CE), potencial de hidrógeno (pH) y temperatura (T°). Además, se monitorea la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST) y turbiedad (Turb.) La evaluación y los análisis se realizaron en los laboratorios de la Universidad Peruana Unión – Filial Juliaca.

Instalación experimental

La instalación experimental consta de 6 bandejas de plástico de 115 L de capacidad, cada una tiene una bomba sumergible marca Sobo WP-1000F de 15 Watt de potencia, adherida al lateral interno de la bandeja de plástico, y conectada a un dispersor para la aireación del mismo reactor, estos sistemas funcionan como reactores de mezcla completa tipo bach. Solo tres reactores están conectados, al sistema de calentamiento solar por colectores planos de bajo costo. Todos los reactores son monitoreados con sensores arduino de temperatura las 24 horas al día (ver figura 1).

Figura 1

Vista de planta de la instalación experimental



Nota. La figura muestra la instalación experimental visto desde la parte superior.

El sistema de transferencia de energía de los colectores solares de plástico de bajo costo a los reactores se realiza a través de un sistema que consta de tres colectores de plástico de 100 m de longitud de polietileno de alta densidad de $\frac{3}{4}$ pulgadas de diámetro color negro. El fluido caloportador que se emplea es agua por su alta capacidad calorífica. Este sistema consta de una bandeja central de 50 L que tiene una bomba sumergible marca Sobo WP-4800 (aquarium power heads) de 45W de potencia que bombea el fluido caloportador a 3 reactores a través de mangueras de plástico de $\frac{1}{2}$ pulgada, la transferencia energética se realiza a través de 6 tubos de aluminio de $\frac{1}{2}$ pulgada de 53 cm de longitud colocadas en la parte inferior de cada bandeja (ver figura 1), el fluido sale a los colectores solares donde se incrementa su temperatura para luego ser vertido a la bandeja concéntrica para reiniciar el circuito.

Para el sistema de control de temperaturas, se empleó una plataforma ARDUINO, el mismo que está basada en un hardware y software libre, flexible y de uso sencillo, con una placa basada en un microcontrolador Atmel AVR. Esta programación conecta los circuitos de la placa con una “interfaz de entrada” con el microcontrolador que procesa y almacena los datos que se registren en una memoria micro SD. En este caso se trabajó con el Arduino NANO, en una sola placa, con una interfaz de entrada de 7 sensores de temperatura (para los 6 reactores y la bandeja central), con una programación de registro de temperaturas de 24 horas en cada variación de la misma, teniendo un aproximado de 6 registros de temperatura por hora, así mismo una interfaz de salida que dirige la información procesada hacia una memoria MICRO SD y una mini pantalla, conectada a la placa que muestra en tiempo real, el registro de la temperatura, hora y fecha.

Medición de parámetros

Los parámetros *in situ* se monitorearon cada 3 días utilizando para el pH un electrodo estándar de pH INTELLICAL con electrolito gel, rango de pH de 0 a 14; resolución de 0.1/0.01/0.001; precisión de ± 0.002 ; rango de mV: ± 1500 y resolución: 0.1mV. Para el OD el electrodo de Oxígeno Disuelto, modelo LDO10101, sensor estándar de LDO IntelliCAL, tecnología LDO basada en la luminiscencia, rango de medición de oxígeno disuelto: 0.00 a 20 mg/L, resolución: 0.01 mg/L. Finalmente para la CE electrodo estándar de Conductividad Eléctrica INTELLICAL de grafito, con un rango de conductividad de 0.01 a 200 mS/cm y precisión: $\pm 0.5\%$ de la lectura, estos electrodos conectados a un multiparámetro portátil digital marca Hach modelo HQ40d con 2 puertos de salida.

La DBO₅, la DQO, los SST y la Turbiedad se monitorearon cada 7 días durante el periodo experimental. Las muestras fueron tomadas siguiendo el “Protocolo de monitoreo de la calidad de los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales” del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, siguiéndose las instrucciones generales de preservación, embalaje y transporte de las muestras, mostradas en el Anexo N° III de esta norma (Requisitos para toma de muestra de agua residual y preservación de las muestras para el monitoreo), teniendo también en cuenta las instrucciones de etiquetado mostradas en el Anexo N° V. Etiqueta para muestras de agua residual (MVCS, 2014).

Tabla 1.

Métodos de análisis en laboratorio

Parámetro	Método de análisis de laboratorio	Regulación
Demanda bioquímica de oxígeno	Método Electrométrico	NTP 214.037:2015
Demanda Química de Oxígeno	Método Colorimétrico.	NTP 360.501:2016.
Sólidos Totales Suspendidos	Método Gravimétrico.	NTP 214.039:2015
Turbiedad	Método Nefelométrico.	NTP 214.006 1999

Nota. Extraído de MVCS, 2014.

Tratamientos

El experimento fue un diseño de bloques completamente al azar con un solo factor (A: calentamiento solar), con dos niveles (a1: con calentamiento solar; a2: sin calentamiento solar) y tres repeticiones, haciendo un total de 6 tratamientos para evaluar (reactores bach de 150 L de agua residual con sistema de aireación), bloqueados a los 0, 7, 14, 21, 28 y 35 días de monitoreo.

Determinación de la eficiencia de remoción

Caicedo (2017), propone una ecuación para determinar el porcentaje de eficiencia en la remoción de los parámetros analizados, en la ecuación 1:

$$\%Eficiencia = \frac{(Concentración\ inicial - Concentración\ final)}{(Concentración\ inicial)} \times 100 \quad (1)$$

Determinación de la energía en el sistema de calentamiento solar

Se propone la siguiente ecuación para determinar la energía acumulada media diaria.

$$\text{Calor} = \text{Masa} \times \text{calor específico del agua} (\text{Temp. final} - \text{Temp. inicial}) \quad (2)$$

Para la determinación del calor se empleó los siguientes datos: 1) masa del agua residual de 115 L en cada bandeja, 2) valor del calor específico del agua de 4.182 KJ/Kg °C, 3) Temperatura Final se considera la temperatura de los tratamientos, 4) Temperatura Inicial se considera la temperatura de la bandeja central de distribución y 5) 1 KJ equivalente a 3600 KW-h.

Análisis de datos estadísticos

Los resultados fueron analizados los Softwares Excel versión, se realizó el análisis de comparación mediante la prueba de diseño de bloques completamente al azar (DBCA) para un solo factor, para determinar la diferencia de medias entre los tratamientos con calentamiento solar por colectores solares y los tratamientos sin calentamiento solar con colectores solares.

Marco normativo peruano e internacional

Para evaluar el cumplimiento normativo se emplearon una serie de normas que nos permiten tener la referencia del cumplimiento nacional e internacional: El decreto Supremo Nº 003-2010 MINAM, efluentes de PTAR de Perú, la resolución 631 – 2015 de lo LMP para prestadores de servicio público de Colombia, la norma mexicana NOM-001-ECOL 1997 (Uso de agua de Rio en riego agrícola), la norma española RD 509/2016, la Directiva 91/271/CEE del consejo de la Unión Europea (Tratamiento de aguas residuales urbanas), finalmente el decreto 109/2015 - Andalucía, regula el valor puntual de las aguas superficiales.

Resultados

La tabla 2 muestra los resultados de la caracterización realizada del agua residual doméstica que se trató.

Tabla 2.

Caracterización del agua residual doméstica.

Parámetro	Unidad	Valor
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L	203
Demanda química de oxígeno	mg/L	434.8
Sólidos suspendidos totales	mg/L	98
Potencial de hidrógeno	---	7.33
Conductividad Eléctrica	μS/cm	1015
Oxígeno disuelto	mg/L	0.84
Turbiedad	UNT	146
Ratio DBO ₅ /DQO	---	0.47

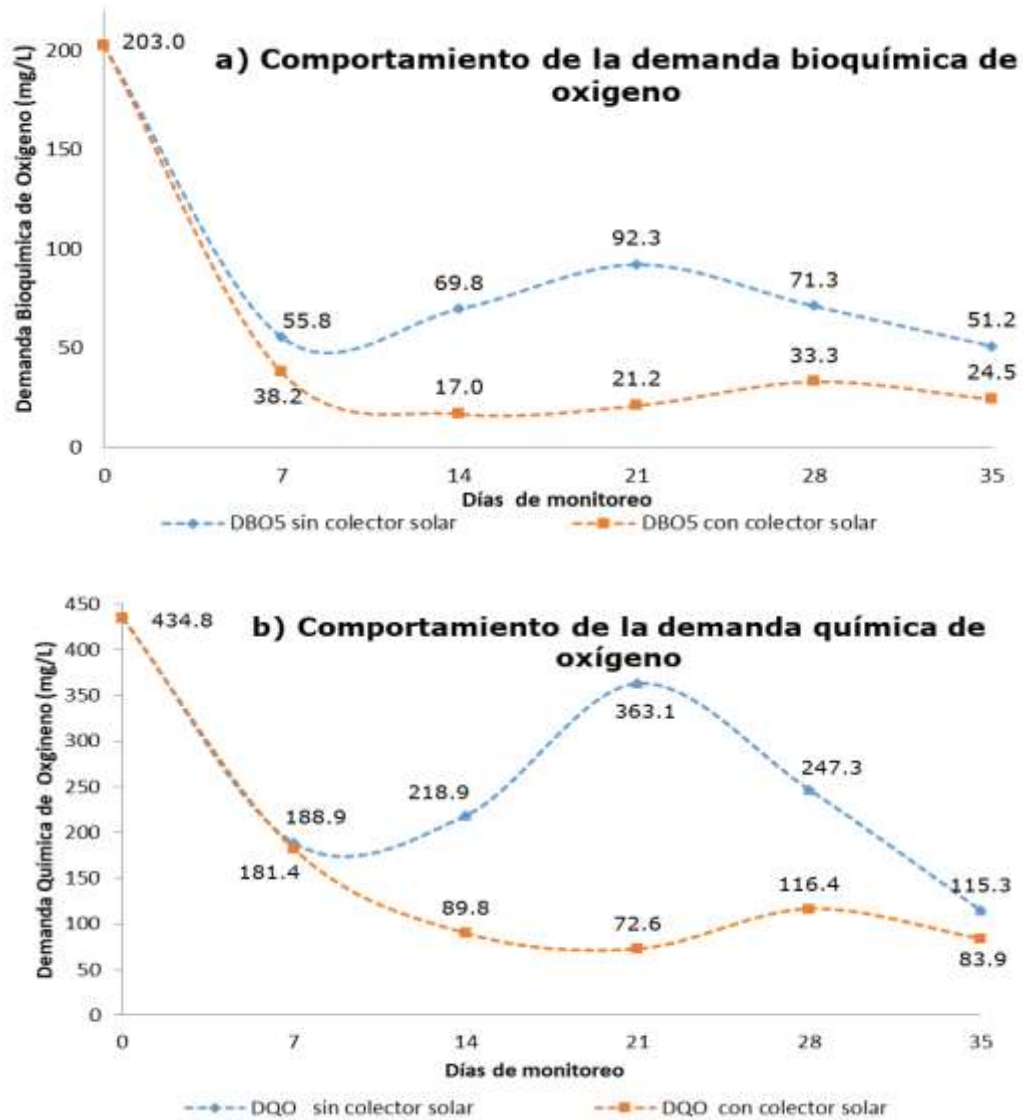
Nota. Datos obtenidos del laboratorio.

La figura 2 muestra el comportamiento de la DBO₅ y DQO durante el periodo experimental, para la DBO₅ el valor más bajo se obtiene a la segunda semana (17 mg/L) en los tratamientos con calentamiento solar por colectores planos de bajo costo; y para los tratamientos sin calentamiento solar el valor más bajo se da a la quinta semana (51.2 mg/L) (ver figura 2 - a).

Por otro lado, para la DQO el valor más bajo se da la tercera semana (72.6 mg/L) en los sistemas con calentamiento solar con colectores planos de bajo costo, y en los tratamientos que no tuvieron calentamiento solar el valor más bajo se da a la quinta semana (115.3 mg/L) (ver figura 2 - b).

Figura 2

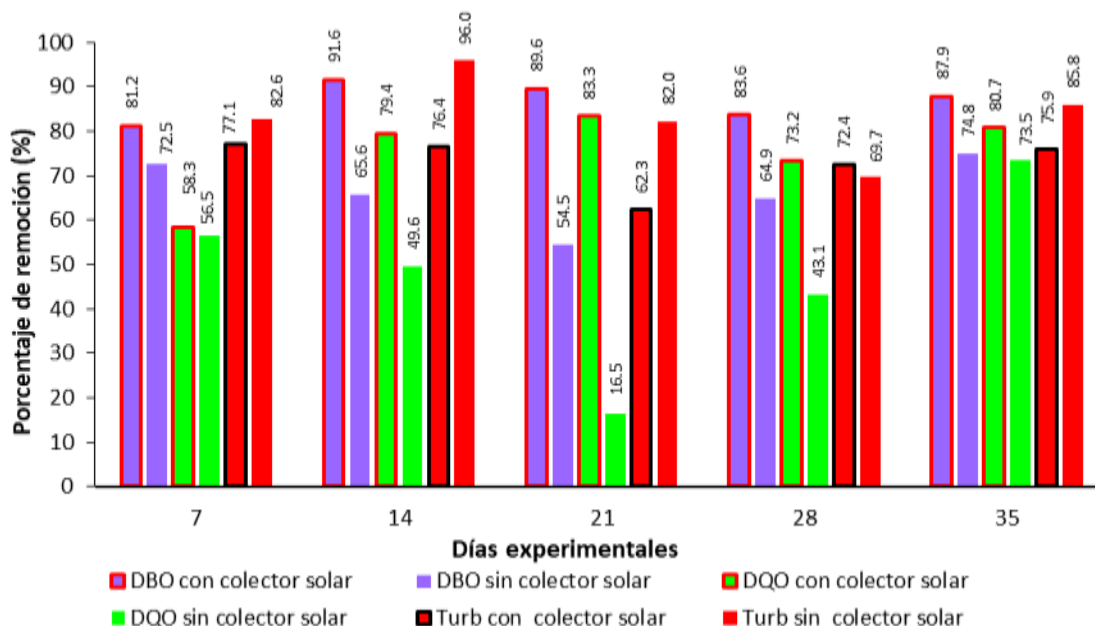
Comportamiento de la demanda bioquímica de oxígeno y la demanda química de oxígeno durante el periodo experimental



Nota. En la figura se muestra DBO5 y DQO durante el transcurso de los 35 días.

Figura 3

Remoción de DBO₅, DQO y turbiedad de acuerdo a los monitoreos cada 7 días.



Nota. En la gráfica se muestra los resultados de acuerdo a los monitoreos cada 7 días. La figura 3 muestra los porcentajes de remoción de la DBO₅ y DQO en función a los monitoreos realizados cada 7 días. Las remociones más altas para los tratamientos con calentamiento solar se obtienen a los 14 días para DBO₅ y DQO y a los 7 días para la turbiedad; sin embargo, en los tratamientos sin calentamiento solar las remociones más altas se presentan a los 35 días para la DBO₅, DQO y turbiedad.

Tabla 3.

Análisis de varianza de la DBO y DQO de los tratamientos.

Parámetros	Fuente	GL	SC	MC	F	P
DBO ₅	Tratamientos	1	12757.1	12757.1	25.3	0.001
	Semanas	8	4030.1	503.8	7.3	0.000
	Error	20	1374.9	68.7	-	-
	Total	29	18162.1	-	-	-
DQO	Tratamientos	1	98229.6	98229.6	6.6	0.033
	Semanas	8	118612.5	14826.6	37.6	0.000
	Error	20	7888.6	394.4	-	-
	Total	29	224730.7	-	-	-

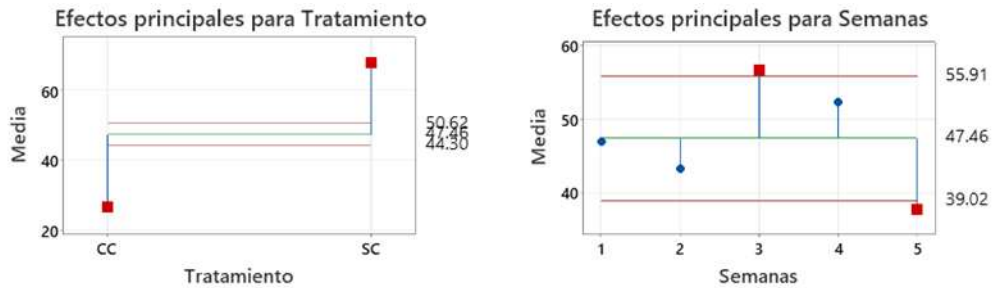
Nota. Elaboración propia.

La tabla 3 muestra el análisis de varianza de los tratamientos para la DBO₅ y DQO, teniendo como variables las semanas de la experimentación, se obtuvo el p-valor de 0.001 para DBO₅ y 0.033 para DQO, la cual nos indica que la disminución de la carga orgánica del agua residual doméstica con el sistema de calentamiento solar, es significativamente más eficiente respecto al sistema sin calentamiento solar.

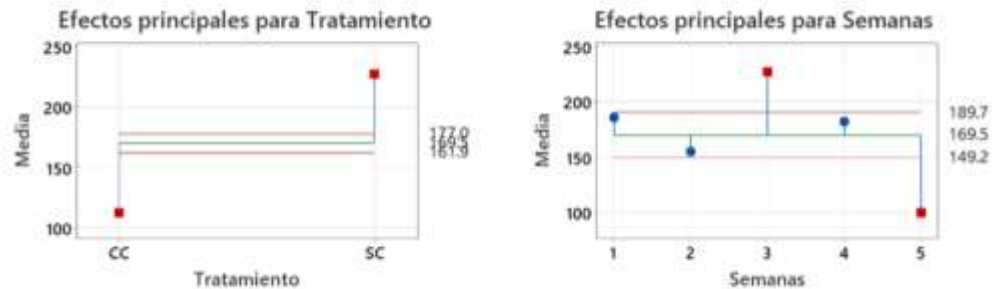
La figura 4 muestra los efectos principales y el tratamiento más efectivo para DBO₅ y DQO.

Figura 4.

Resultados del modelo estadístico de diseño de bloques completos al azar de un solo factor de los parámetros de DBO₅, y DQO.



a) Valores para DBO₅, de acuerdo al estadístico DBCA.



b) Valores para DQO, de acuerdo al estadístico DBCA.

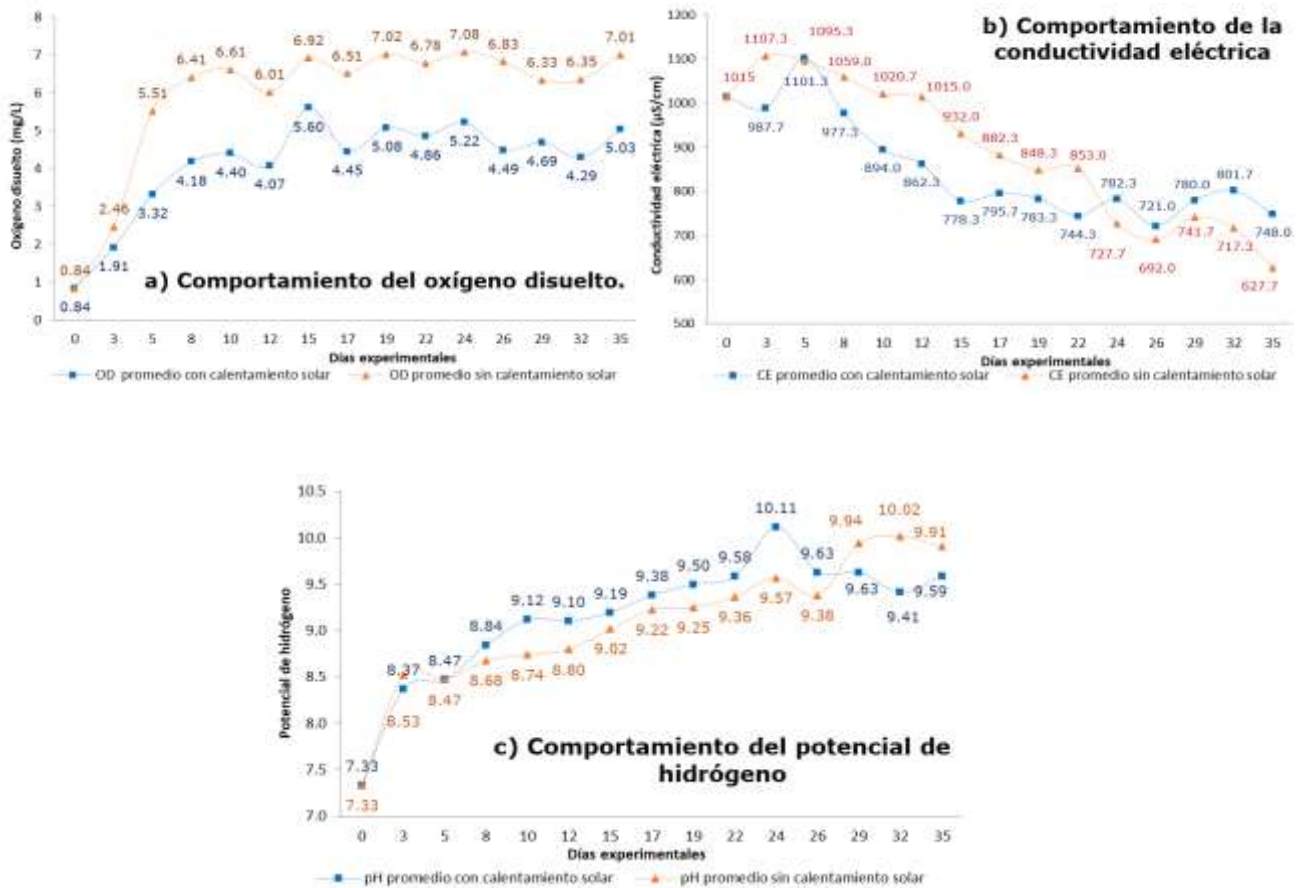
Nota. Elaboración propia.

De acuerdo a la Figura 4 a) muestra los valores para el DBO₅ indicando que para el efecto de tratamiento con calentamiento (CC) presenta un valor de 25 mg/L, y sin calentamiento (SC) de 70 mg/L. Para el efecto de semanas indican que la semana 3 tuvo un valor de 55.91 mg/L y la semana 5 un valor de 39 mg/l. En la figura 4 b) se observa la cuantificación de la DQO, para el efecto de tratamiento con calentamiento (CC) tiene un valor de 110 mg/L y

para sin calentamiento (SC) un valor de 225 mg/L. Para el efecto de semanas, la 3 semana tiene un valor de 220 mg/L y para la 5 semana con un valor de 100 mg/L. La figura 5 muestra el comportamiento de parámetros control durante la experimentación.

Figura 4.

Comportamiento de los parámetros a) oxígeno disuelto, b) conductividad eléctrica y c) potencial de hidrógeno

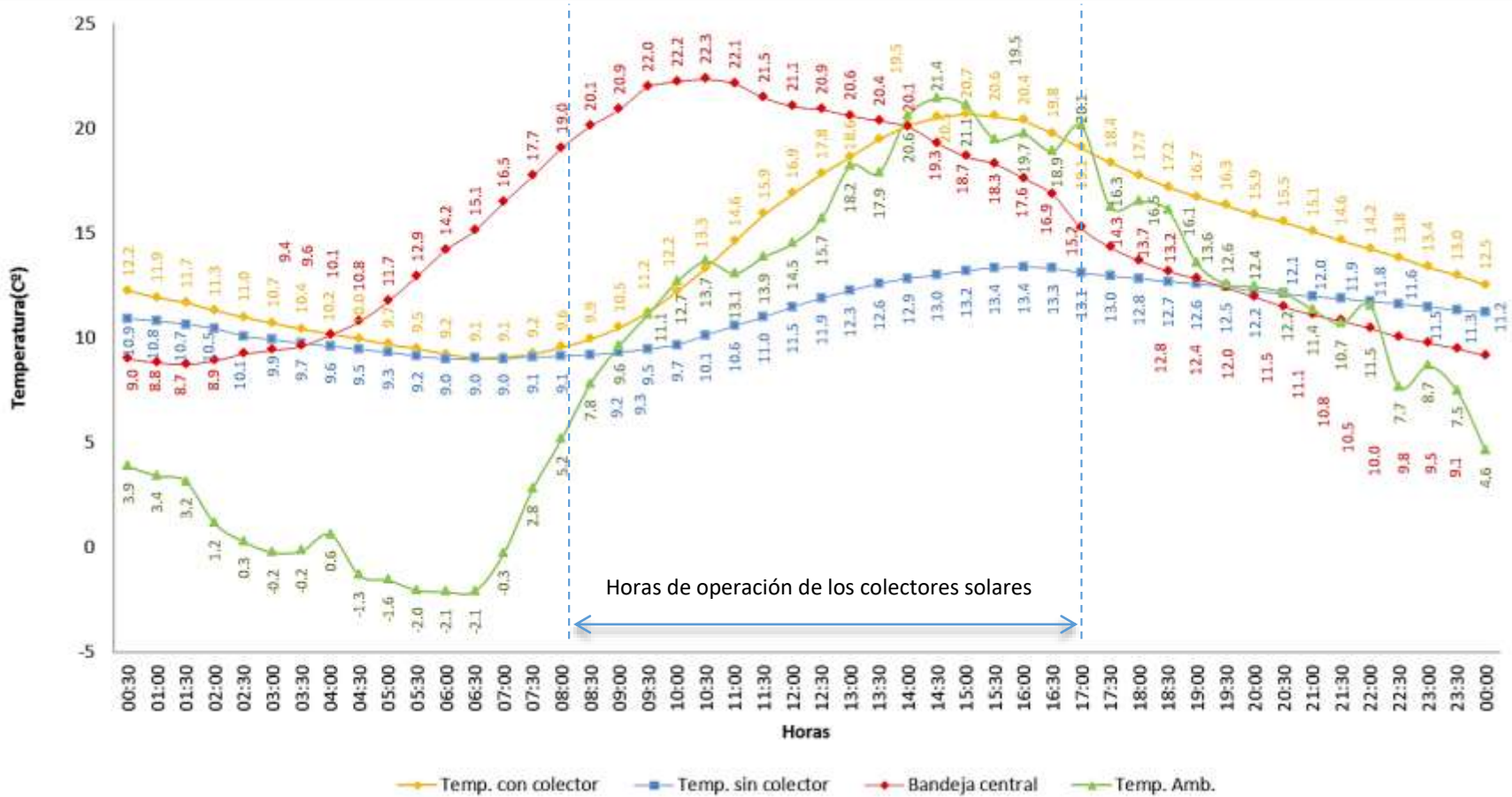


Nota. Elaboración propia

La figura 5 muestra el comportamiento de la temperatura promedio durante 24 horas de los sistemas con y sin conexión a los colectores solares, la temperatura ambiental, así mismo muestra la temperatura de la bandeja central donde se recolecta el agua después del proceso de calentamiento, mostrando así el comportamiento en cada uno de los sistemas.

Figura 5.

Comportamiento de la temperatura promedio en un día de operación (Mayo- Junio).

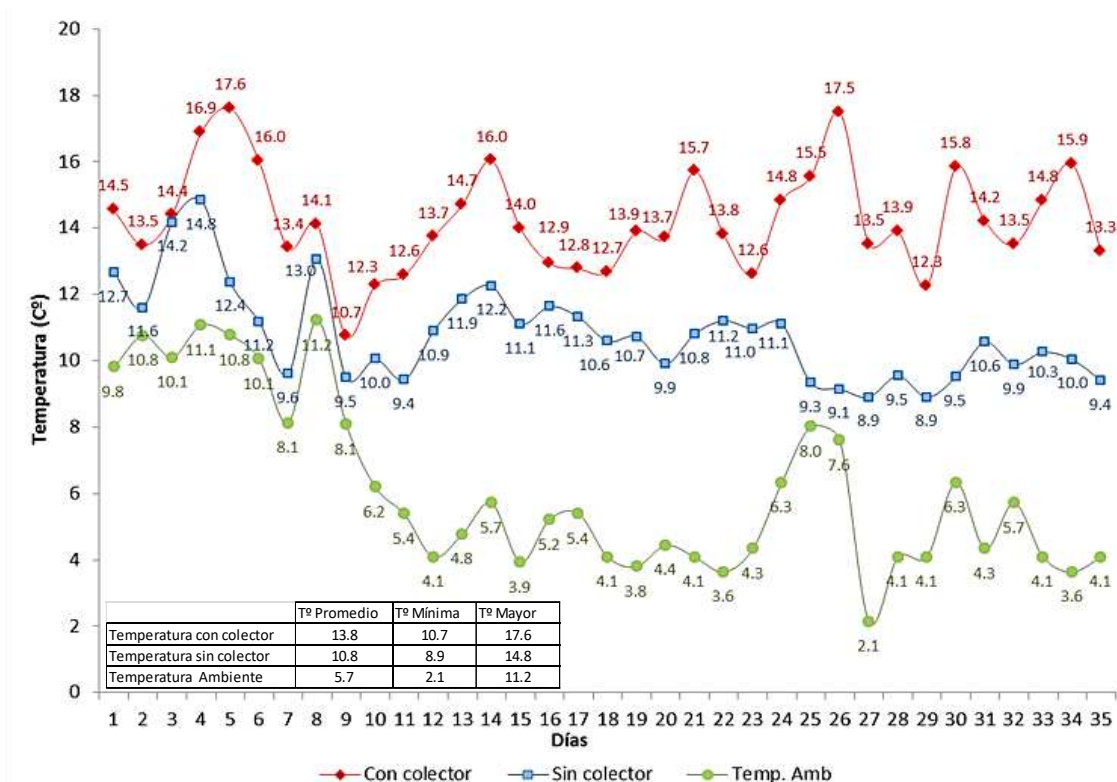


Nota. Elaboración propia.

La figura 6 muestra el comportamiento de la temperatura promedio durante los 35 días de experimentación, la línea verde muestra la temperatura ambiental, la línea azul muestra los tratamientos sin colectores solares y la línea roja muestra las temperaturas de los tratamientos con colectores solares.

Figura 6.

Comportamiento de las temperaturas



Nota. Elaboración propia.

La tabla 3 muestra los resultados de la energía acumulada por los colectores solares (993.3 KW-H) durante los 35 días experimentales de los 3 reactores (120 L) con calentamiento solar. Además, se cuantifica el costo de energía acumulada empleando el valor que presenta la International Renewable Energy Agency (IRENA) de \$ 0.0677/Kw-h, que corresponde al costo de energía solar fotovoltaica por ser la más cercano al tipo de energía captada. Además, se presenta comparaciones con la empresa eléctricas Electro Puno y el Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (Osinerming), para conocer el porcentaje de energía ahorrada empleando energías renovables (valor de cambio S/. 3.986 x \$1.00).

Tabla 3.

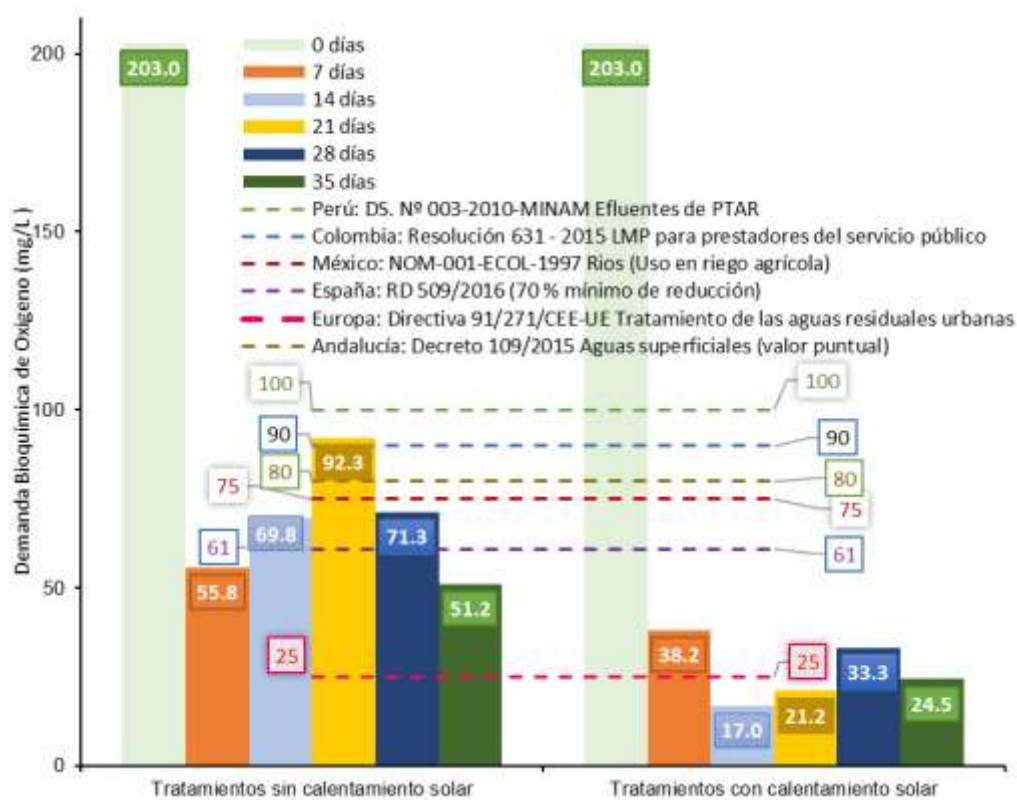
Energía acumulada en los tratamientos con calentamiento solar

Institución	Costo (kw-h)	KW-h (acumulado)	Costo Total	S/. ahorrados	Porcentaje
Osinerming	S/.0.669	\$0.1678	993.3	S/. 396.46	59.7%
Electro Puno	S/.0.644	\$0.1493	993.3	S/. 322.96	54.6%
IRENA (solar fotovoltaica)	S/.0.270	\$0.0677	993.3	-	-

La figura 7 muestra el cumplimiento del marco normativo nacional e internacional de la DBO₅.

Figura 7.

Cumplimiento del marco normativo de la DBO₅.



Nota. Elaboración propia.

Discusión

Los resultados de la caracterización del agua residual doméstica que se trató muestran un OD de 0.84 mg/L (ver tabla 2); en los tratamientos con sistemas de aireación los sistemas sin calentamiento solar tuvieron mayor cantidad de oxígeno (5.51 a 7.01 mg/L) en comparación a los que tuvieron calentamiento (3.32 a 5.60 mg/L) (ver figura 4-a), por que a mayor temperatura mayor volatilidad del oxígeno disuelto. Según, Buitrón Méndez et al. (2018) la concentración mínima de OD en los sistemas aerobios el agua residual debe de estar entre 1.0 - 2.0 mg/L, aunque en sistemas con nitrificación puede estar entre 2 - 6 mg/L, pero valores superiores a 4 mg/L difícilmente mejoran la tratabilidad, pero incrementan el consumo de energía que repercute en los costos de operación. El valor de pH inicial fue de 7.33 (nivel medio), 1015 $\mu\text{S}/\text{cm}$ CE de (nivel alto), de acuerdo a Henze (1992) pertenecen a valores típicos de aguas residuales urbanas. Para Metcalf y Eddy (1995) los SST (98 mg/L) presentan una concentración baja, y la turbidez tiene un valor de 146 UNT que se presenta como un dato de referencia de transparencia del agua residual. El ratio de la DBO_5 /DQO es de 0.47, que de acuerdo a Ardila Arias et al. (2012) es poco biodegradable. Pero de acuerdo a Henze y Comeau (2011) la ratio DBO_5 /DBO corresponde a una relación típica media de aguas residuales municipales.

La figura 2 muestra que el resultado más bajo de depuración para DBO_5 se presenta a los 14 días (17 mg/L) en los tratamientos con calentamiento solar, y para los tratamientos sin calentamiento solar el valor más bajo se presentó a los 35 días (51.2 mg/L). Sin embargo, en la DQO en tratamientos con calentamiento solar el valor más bajo de depuración se presenta a los 21 días (72.6 mg/L) y 35 días para los tratamientos sin calentamiento solar. Mamani Mamani y Alvarez Rivas (2022) realizaron una investigación de tratamientos de aguas residuales provenientes de pozos sépticos en condiciones ambientales similares a la investigación empleando colectores de plástico análogos para calentar lombrifiltros obteniendo resultados con fluctuaciones de DBO_5 y DQO en el tiempo. Así mismo, en la investigación de Peña-Hernandez et al. (2015) en la que se determina la relación entre la producción de biopolímeros y la remoción de DBO_5 , DQO y SST en un reactor aerobio continuo; el seguimiento de la DBO_5 y DQO se muestra un comportamiento con fluctuaciones en el tiempo como en el estudio actual, teniendo mayores porcentajes de remoción a las 2 y 3 semanas, y ascensos hasta el día 30 de su periodo experimental.

En los tratamientos con calentamiento solar en condiciones altoandinas se alcanzaron remociones de 91.6 y 83.3% para DBO_5 y DQO (ver figura 3); estos valores

se asemejan a los León-Chimbolema et al. (2022), que emplearon destiladores solares sobre la carga orgánica en agua residual industrial-doméstica alcanzando 89.96 y 96.02 % para DBO₅ y DQO. Por otro lado, Huiza Cayetano y Ordoñez Cayetano (2018) determinaron la eficiencia para tratar aguas residuales domésticas empleando la técnica de pared caliente, con la obtuvieron eficiencia de remoción superior al 62.5% DBO₅. Además, esta investigación que se realizó en condiciones altoandinas, obtuvo resultados similares a los de Vigo Rivera (2020) que en su estudio empleo un reactor aerobio obteniendo 79.9% de remoción de DBO₅.

La tabla 4 muestra la energía que se acumula por los colectores de plástico durante el periodo experimental, obteniendo 993.3 KW-h. Además, se obtiene porcentajes de ahorro de 59.7 y 54.6% de ahorro empleando energías renovables frente a las energías convencionales.

La figura 4 muestra los comportamientos de los parámetros del oxígeno disuelto, conductividad eléctrica y potencial de hidrogeno. Los tratamientos alcanzan valores de oxígeno disuelto superiores después del quinto día, para los tratamientos aerobios con calentamiento estos valores oscilan entre 4.07 a 5.06 mg/L, y para los tratamientos aerobios sin calentamiento estos valores oscilan entre 5.51 a 7.02 mg/L en condiciones altoandinas. Estos valores son similares a la investigación de Vigo Rivera (2020) que realizo su trabajo bajo condiciones parecidas con valores de 4.10 a 7.02 mg /L. La conductividad tiende a disminuir y el pH tiende a incrementarse, esto se debe a que de acuerdo a Metcalf y Eddy (1995) las aguas residuales son alcalinas.

La figura 5 muestra los comportamientos de las temperaturas durante el periodo experimental, mostrando que bajo condiciones altoandinas temperaturas ambientales promedio fue de 5.7 °C en los meses de mayo – junio, en cambio Vigo Rivera y Matos Chamorro (2020) tuvieron temperaturas promedio de 10.1 °C en los meses de octubre - noviembre. Esto se debe a que los meses más fríos del altiplano peruano son de mayo, junio y julio (Dionicio Herredia, 2019). Las temperaturas ambientales más bajas se dan desde las 2:00 a 7:00 horas (Ver figura 5).

La figura 7 muestra la comparación con 6 normas referente a tratamiento de aguas residuales. Empleando calentamiento solar con colectores de plástico en los tratamientos se logra cumplir a los 14 días con la norma más exigente (Andalucía Decreto 109/2015) (ver figura 7); en contraste en los tratamientos sin colectores a los 7 días se logra el cumplimiento con la segunda norma más exigente (Europa: Directiva 91/271/CEE-UE).

Conclusiones

Es factible emplear colectores solares de bajo costo, en condiciones altoandinas para la disminución de carga orgánica en aguas residuales domésticas.

El agua residual tratada presentó características típicas de su origen doméstica con una DBO_5 de 434.75 mg/L, DQO de 203 mg/L, SST 98 mg/L, OD 0.84 mg/L, CE de 1015 μ S/cm y un pH de 7.33. El ratio de relación DBO_5 /DQO es poco biodegradable. Los tratamientos con calentamiento solar tuvieron mayor disminución de carga orgánica (DBO_5 y DQO) que los tratamientos sin calentamiento solar.

Los colectores solares de plástico acumularon 993.3 kW-h de energía durante el periodo experimental, generando ahorros energéticos de captación de energía renovables en comparación a la energía convencional.

Los tratamientos con calentamiento solar con colectores de plástico presentan mejores resultados del cumplimiento de las 6 normas sobre tratamiento de aguas residuales peruana e internacionales.

Referencias

- Ardila Arias, A. N., Reyes Calle, J., Arriola Villaseñor, E., y Alfredo Hernández, J. (2012). Remoción fotocatalítica de DQO, DBO5 y COT de efluentes de la industria farmacéutica. *Revista Politécnica*, 15, 9-17.
- Buitrón Méndez, G., Reino Sánchez, C., y Carrera Muyo, J. (2018). Manual técnico sobre tecnologías biológicas aerobias aplicadas al tratamiento de aguas residuales industriales. En *Ciencia y Tecnología para el Desarrollo*. <https://bit.ly/3VXjXr4>
- Casas Tapia, L. I. (2020). *Análisis de alternativas de tratamiento para la potabilización de aguas subterráneas en la isla de San Andrés* [Universidad de Antioquía]. <https://bit.ly/3Xdqdfn>
- Dionicio Herredia, E. A. (2019). *Grado de correlación entre el clima antártico con las heladas en las provincias de Juliaca y Puno entre los años 2006-2016*. Fuerza aérea del Perú - Escuelas de Oficiales.
- Garcés Giraldo, L. F., Mejía Franco, E. A., y Santamaría Arango, J. J. (2004). Photocatalysis as an alternative to treat waste water. *Revista Lasallista de Investigación*, 1(1), 83-92.
- Gonzales H., A., Martín D., A., y Figueroa, R. (2015). Tecnologías de tratamiento y desinfección de agua para uso y consumo humano. *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*, 1-17. <https://bit.ly/3WX98Xm>
- Gonzales Herrera, A., y Martín Dominguez, A. (2003). Capítulo 9: Desinfección solar, una alternativa para pequeñas comunidades rurales. En *Agua potable para comunidades rurales, reuso y tratamientos avanzados de aguas residuales domésticas* (pp. 110-120). Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del Agua (RIPDA) - Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED). <https://bit.ly/3WX2wZ5>
- Henze, M. (1992). Characterization of wastewater for modelling of activated sludge processes. *Water Science and Technology*, 25(6), 1-15. <https://doi.org/10.2166/wst.1992.0110>
- Henze, M., y Comeau, Y. (2011). Wastewater Characterization. En *Biological wastewater treatment: principles, modelling and design* (pp. 33-52). IWA Pub. <https://doi.org/10.2166/9781780409146>
- Huiza Cayetano, J. K., y Ordoñez Cayetano, N. G. (2018). Eficiencia de lombrifiltro implementando la técnica de pared caliente en el tratamiento de aguas residuales domésticas del centro poblado de Huaylacucho del distrito de Huancavelica-2018. *Universidad Nacional de Huancavelica*, 113. <https://bit.ly/3ZjmNK3>
- INEI. (2021). *Instituto Nacional de Estadística e Informática*. <https://www.gob.pe/institucion/inei/tema/informacion-estadistica>
- León-Chimbolema, J. G., Godoy-Ponce, S. C., y Miguez-Paredes, R. A. (2022). Teoría y experiencia con destiladores solares para aguas residuales domésticas. Caso de estudio – Riobamba. *Polo del Conocimiento*, 7(2), 577-593. <https://doi.org/10.23857/pc.v7i1.3604>

- Mamani Mamani, R., y Alvarez Rivas, D. J. (2022). *Depuración de aguas residuales con colectores solares en un sistema de lombrifiltro para la remoción de elevadas cargas orgánicas en condiciones altoandinas* Tesis [Universidad Peruana Unión]. <https://bit.ly/3ZjU3ko>
- Martínez-Taberner, A., Martínez-Moll, V., Moyà-Niell, G., Moyà-Salom, A., y Amengual Morro, C. (2007). Depuración alternativa, con aporte térmico de energía solar. *Investigaciones Geográficas*, 42(42), 177. <https://doi.org/10.14198/ingeo2007.42.09>
- Metcalf y Eddy. (1995). *Ingeniería de Aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización* (3ª Edición). McGraw-Hill.
- MVCS. (2014). Protocolo de monitoreo de la calidad de los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales. *El Peruano*, 31. <https://bit.ly/3vNS3Du>
- ONU. (2022). *Objetivo 6: Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos*. <https://bit.ly/2K1E2sJ>
- Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería - OSINERGMIN. (2017). La Industria de la Energía Renovable en el Perú, 10 años de contribuciones a la mitigación del cambio climático. En *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 1). <https://bit.ly/3GQkeYw>
- Peña-Hernandez, G. A., Cuesta-Gonzalez, F. A., y Betancur Perez, J. F. (2015). Remoción de carga contaminante en aguas residuales industriales a escala de laboratorio. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 6(2), 157. <https://doi.org/10.22490/21456453.1413>
- Quispe Huamán, L., y Sotomayor Alzamora, G. (2022). Determinación y análisis temporal de la radiación solar global en el Altiplano de Puno. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 30(1), 69-81. <https://doi.org/10.4067/s0718-33052022000100069>
- Restrepo, G. M., Rios, L. A., Marin, J. M., Montoya, J. F., y Velásquez, J. A. (2008). Evaluación del tratamiento fotocatalítico de aguas residuales industriales empleando energía solar. *DYNA (Colombia)*, 75(155), 145-153. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7555559>
- SENAMHI. (2003). *Atlas de energía solar*. 44.
- SUNASS. (2022). *Diagnóstico de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en el ámbito de las empresas prestadoras*.
- Torres-Parra, C. A., García-Ubaque, C. A., García-Ubaque, J. C., García-Vaca, M. C., y Pacheco-García, R. (2017). Safe water for rural communities from an alternative filtration system. *Revista de Salud Pública*, 19(4), 453-459. <https://doi.org/10.15446/rsap.v19n4.56039>
- Torres Andrade, G. F. (2014). *Tratamiento de aguas residuales mediante la combinación de técnicas avanzadas de oxidación y biofiltros* [Universidad de las Palmas de Gran Canaria]. <https://bit.ly/3GOonME>

- UNESCO. (2017). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017: Aguas Residuales, el recurso desaprovechado. En *Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura*.
- Valencia Arias, A., Arango Botero, D., Lobo Laverde, J. C., Álvarez Tamayo, L., Contreras Lobo, A., García Aragón, S., Ruiz Echavarría, L., y Augusto Vásquez, C. (2011). Energía Solar en Zonas No Interconectadas : el caso de Paz de Ariporo. *Ninth LACCEI Latin American and Caribbean Conference (LACCEI'2011)*. <https://bit.ly/3XhPVQe>
- Vigo Rivera, J. E. (2020). *Efecto de Microorganismos Eficaces (ME) en el proceso de depuración de aguas residuales domésticas en condiciones altoandinas*. Universidad Peruana Unión.
- Vigo Rivera, J. E., y Matos Chamorro, R. A. (2020). Evaluation of effective microorganisms (EM) in the process of treatment of domestic wastewater in high-andean conditions. *4th SmallWat21v*.
- WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas). (2017). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. Aguas residuales: El recurso desaprovechado*.

Anexos

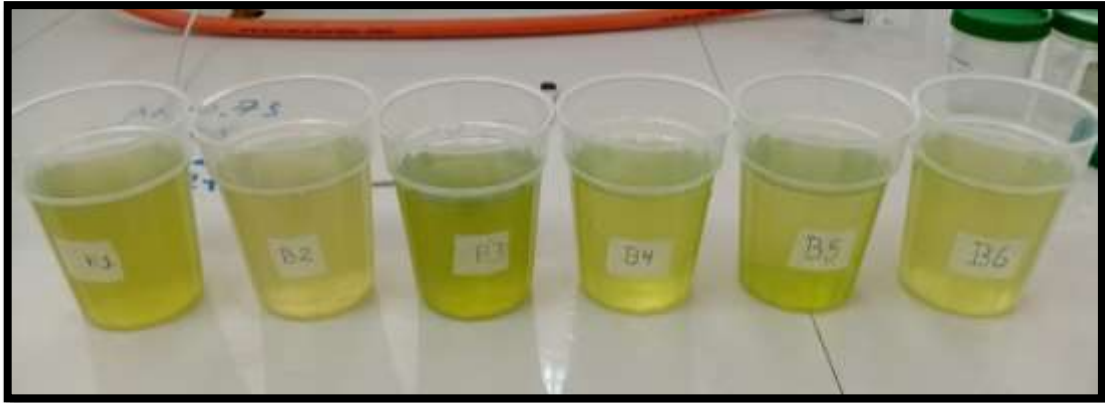
1. Disminución de turbiedad desde una perspectiva organoléptica



2. Monitoreo de la conductividad eléctrica y oxígeno disuelto



3. Medición de turbidez de las 6 muestras con diferentes tratamientos.



4. Experimentación en campo (monitoreo de conductividad eléctrica)



5. Monitoreo de temperatura con sensores Arduino en la experimentación.

