

J-40402082-9

F
u
n
d
a
c
i
ó
n

A
u
l
a

V
i
r
t
u
a
l

Aula Virtual



Generando Conocimiento

<http://www.aulavirtual.web.ve>



ISSN: 2665-0398

Vol. 7 Nº 14 Año 2026

Deposito Legal: LA2020000026

Periodicidad Continua



REVISTA CIENTÍFICA AULA VIRTUAL

Director Editor:

- Dra. Leidy Hernández PhD.
- Dr. Fernando Bárbara

Consejo Asesor:

- MSc. Manuel Mujica
- MSc. Wilman Briceño
- Dra. Harizmar Izquierdo
- Dr. José Gregorio Sánchez

Revista Científica Arbitrada de Fundación Aula Virtual

Email: revista@aulavirtual.web.ve

URL: <http://aulavirtual.web.ve/revista>



Generando Conocimiento

ISSN: 2665-0398
 Depósito Legal: LA2020000026
 País: Venezuela
 Año de Inicio: 2020
 Periodicidad: Continua
 Sistema de Arbitraje: Revisión por pares. "Doble Ciego"
 Licencia: Creative Commons [CC BY NC ND](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)
 Volumen: 7
 Número: 14
 Año: 2026
 Período: Enero 2026 - Junio 2026 (continua)
 Dirección Fiscal: Av. Libertador, Arca del Norte, Nro. 52D, Barquisimeto estado Lara, Venezuela, C.P. 3001

La Revista seriada Científica Arbitrada e Indexada **Aula Virtual**, es de acceso abierto y en formato electrónico; la misma está orientada a la divulgación de las producciones científicas creadas por investigadores en diversas áreas del conocimiento. Su cobertura temática abarca Tecnología, Ciencias de la Salud, Ciencias Administrativas, Ciencias Sociales, Ciencias Jurídicas y Políticas, Ciencias Exactas y otras áreas afines. Su publicación es **CONTINUA**, indexada y arbitrada por especialistas en el área, bajo la modalidad de doble ciego. Se reciben las producciones tipo: *Artículo Científico* en las diferentes modalidades cualitativas y cuantitativas, *Avances Investigativos*, *Ensayos*, *Reseñas Bibliográficas*, *Ponencias o publicaciones derivada de eventos*, y cualquier otro tipo de investigación orientada al tratamiento y profundización de la información de los campos de estudios de las diferentes ciencias. La Revista **Aula Virtual**, busca fomentar la divulgación del conocimiento científico y el pensamiento crítico reflexivo en el ámbito investigativo.



EFECTO DEL TRATAMIENTO SOLAR SODIS SOBRE LA CALIDAD MICROBIOLÓGICA DEL AGUA Y DEL CULTIVO HIDROPÓNICO DE LECHUGA

EFFECT OF SOLAR WATER DISINFECTION ON THE MICROBIOLOGICAL PARAMETERS OF HYDROPONIC LETTUCE

Tipo de Publicación: Artículo Científico

Recibido: 10/01/2026

Aceptado: 11/02/2026

Publicado: 10/04/2026

Código Único AV: e657

Páginas: 1(838-852)

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.19496646>

Autores:

Katty Miluska Romero Espinoza

Bachiller en Ingeniería Ambiental y Sanitaria

 <https://orcid.org/0009-0004-4478-2865>

E-mail: 2019161045@unh.edu.pe

Afiliación: Universidad Nacional de Huancavelica

País: República del Perú

Jorge Luis Huere Peña

Ingeniero Metalurgista

Maestro en Ciencias de la Computación e Informática

Doctor en Ciencias Ambientales

 <https://orcid.org/0000-0002-3114-8134>

E-mail: jorge.huere@unh.edu.pe

Afiliación: Universidad Nacional de Huancavelica

País: República del Perú

Russbelt Yaulilahua Huacho

Ingeniero Ambiental y Sanitario

Maestro en Ecología y Gestión Ambiental

 <https://orcid.org/0000-0002-7007-3059>

E-mail: russbelt.yaulilahua@unh.edu.pe

Afiliación: Universidad Nacional de Huancavelica

País: República del Perú

Resumen

La hidroponía constituye una alternativa agrícola sostenible que optimiza el uso del agua y el espacio; sin embargo, la calidad microbiológica del agua representa un factor crítico, especialmente cuando se emplean aguas residuales tratadas. El propósito de esta investigación fue evaluar el efecto de la calidad del agua tratada con desinfección solar (SODIS) sobre los parámetros microbiológicos del cultivo hidropónico de lechuga (*Lactuca sativa*) en el distrito de Yauli, durante el año 2024. La metodología utilizada fue cuantitativa, descriptiva y comparativa. Se analizaron 24 muestras de lechuga hidropónica, distribuidas en pretratamiento y postratamiento. Se evaluaron parámetros fisicoquímicos y microbiológicos mediante métodos estandarizados (NMP). Resultados, el tratamiento SODIS mejoró los parámetros fisicoquímicos del agua, manteniéndolos dentro de los límites normativos. Los coliformes fecales en lechuga se redujeron a valores inferiores al límite de detección (<3 NMP/g) en postratamiento, cumpliendo la normativa. No obstante, los coliformes totales disminuyeron significativamente de (15 000 - 21 000 a 900 - 2 100 NMP/g), continuaron excediendo el límite permisible (<100 NMP/g) en todas las muestras. Se concluye, el método SODIS resultó eficaz para mejorar la calidad del agua y reducir la carga microbiológica, especialmente de coliformes fecales.

Palabras Clave

Calidad del agua, desinfección solar, parámetros microbiológicos, lechuga hidropónica.

Abstract

Hydroponics constitutes a sustainable agricultural alternative that optimizes water and space use; however, the microbiological quality of water represents a critical factor, particularly when treated wastewater is employed. The purpose of this study was to evaluate the effect of water quality treated with solar disinfection (SODIS) on the microbiological parameters of hydroponic lettuce (*Lactuca sativa*) cultivated in the district of Yauli during 2024. The methodology was quantitative, descriptive, and comparative. A total of 24 hydroponic lettuce samples were analyzed, distributed between pre-treatment and post-treatment conditions. Physicochemical and microbiological parameters were evaluated using standardized methods (MPN). The results showed that the SODIS treatment improved the physicochemical parameters of the water, keeping them within regulatory limits. Fecal coliforms in lettuce were reduced to values below the detection limit (<3 MPN/g) in the post-treatment stage, thus complying with regulations. However, although total coliforms decreased significantly (from 15,000 - 21,000 to 900 - 2,100 MPN/g), they continued to exceed the permissible limit (<100 MPN/g) in all samples. It was concluded that the SODIS method was effective in improving water quality and reducing the microbiological load, particularly fecal coliforms.

Keywords

Water quality, solar disinfection, microbiological parameters, hydroponic lettuce.

Introducción

En las últimas décadas, el cultivo hidropónico se consolidó a nivel mundial como una alternativa agrícola sostenible frente a los crecientes desafíos asociados a la seguridad alimentaria, la degradación de los suelos y la escasez del recurso hídrico (Albuja et al., 2021). Esta técnica permitió optimizar el uso del agua, incrementar la productividad por unidad de superficie y reducir la dependencia de condiciones edafoclimáticas tradicionales, lo que favoreció su adopción en contextos urbanos, periurbanos y regiones con limitaciones ambientales severas (FAO, 2017). No obstante, el éxito de los sistemas hidropónicos dependió de manera crítica de la calidad del agua empleada, particularmente desde el punto de vista microbiológico, dado que el agua actúa simultáneamente como medio de transporte de nutrientes y como vector potencial de contaminantes biológicos (Gilsanz, 2007).

A nivel internacional, la crisis hídrica se intensificó como consecuencia del crecimiento poblacional, el cambio climático, la expansión urbana y el uso ineficiente de los recursos hídricos (Magallanes, 2022). Este escenario condujo a que numerosos países recurrieran al uso de aguas residuales, tratadas o sin tratar, para fines agrícolas, especialmente en regiones áridas y semiáridas donde el acceso al agua dulce resultó limitado (Hettiarachchi & Ardekanian, 2017).

En países como México, el empleo de aguas

residuales en la producción de hortalizas de consumo directo, entre ellas la lechuga, fue ampliamente documentado como una práctica frecuente, aunque asociada a riesgos significativos de contaminación microbiológica (Serna, 2018.a; Sant'Ana, 2023). Estas aguas pueden contener microorganismos patógenos, nutrientes en exceso y compuestos químicos peligrosos, lo que representa un riesgo tanto para la sanidad vegetal como para la salud pública (Díaz et al., 2024).

La problemática internacional se vio agravada por la insuficiencia de sistemas de tratamiento de aguas residuales eficientes, particularmente en países en desarrollo, donde las limitaciones económicas y tecnológicas dificultaron la implementación de tratamientos avanzados como la ósmosis inversa, la ozonización o la desinfección ultravioleta (Moscoso, 2016).

Si bien estos métodos demostraron alta eficacia en la eliminación de microorganismos patógenos, su elevado costo de instalación, operación y mantenimiento restringió su aplicación en contextos rurales y comunidades vulnerables (González, 2012; Semino, 2015). En este contexto, surgió la necesidad de explorar alternativas sostenibles, accesibles y de bajo costo que permitieran mejorar la calidad microbiológica del agua destinada a la producción agrícola (Park & Williams, 2024).

Entre dichas alternativas, la desinfección solar

del agua (SODIS) se posicionó como una tecnología apropiada, especialmente en regiones con alta radiación solar (Van et al., 2016).

Este método aprovechó la acción combinada de la radiación ultravioleta y el aumento de la temperatura del agua para inactivar microorganismos patógenos, mostrando resultados favorables en la mejora de la calidad microbiológica del agua destinada al consumo humano y agrícola (Meierhofer & Wegelin, 2003; Márquez-Bravo, 1998). Estudios internacionales evidenciaron que el método SODIS logró reducciones significativas de bacterias indicadoras de contaminación fecal, lo que sustentó su aplicación en contextos de escasez hídrica y limitaciones económicas (Prazeres et al., 2017; García-Gil et al., 2021).

En el ámbito nacional, el Perú enfrentó una problemática similar caracterizada por la escasez de agua y la contaminación de fuentes hídricas superficiales y subterráneas. El crecimiento demográfico, la actividad minera, el desarrollo urbano desordenado y la limitada cobertura de plantas de tratamiento de aguas residuales contribuyeron al deterioro de la calidad del agua disponible para uso agrícola (Fernández, 2017).

Ante este escenario, la reutilización de aguas residuales emergió como una alternativa viable para satisfacer la demanda hídrica del sector agrícola; sin embargo, esta práctica exigió garantizar condiciones adecuadas de calidad microbiológica,

especialmente cuando se trató de cultivos destinados al consumo en fresco, como la lechuga (Serna, 2018.b).

En regiones altoandinas del país, como el departamento de Huancavelica, la problemática hídrica adquirió una dimensión aún más crítica. En el distrito de Yauli, la agricultura constituyó la base de la economía rural, pero estuvo fuertemente condicionada por la estacionalidad de las lluvias y la limitada disponibilidad de agua para riego durante gran parte del año (Gobierno Regional de Huancavelica, 2021). Esta situación obligó a los agricultores a concentrar sus actividades productivas en los meses de mayor precipitación, exponiéndose a eventos climáticos adversos como heladas, lluvias intensas y vientos fuertes, que afectaron negativamente la productividad agrícola (Gobierno Regional de Huancavelica, 2017).

En este contexto, el uso de aguas residuales tratadas provenientes de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de Yauli se planteó como una alternativa potencial para el riego en sistemas hidropónicos. No obstante, la ausencia de normativas nacionales específicas para el reúso agrícola de aguas residuales y la persistencia de riesgos microbiológicos evidenciaron la necesidad de evaluar rigurosamente la calidad del agua y su impacto sobre los cultivos producidos (Fernández, 2017). La aplicación del método SODIS en este escenario se justificó por su bajo costo, facilidad de

implementación y adecuación a las condiciones climáticas de la zona, caracterizadas por una elevada radiación solar.

La elección de la lechuga (*Lactuca sativa*) como especie de estudio respondió a su elevada importancia alimentaria, económica y nutricional, así como a su alta susceptibilidad a la contaminación microbiológica. La lechuga se posicionó como una de las hortalizas de hoja más consumidas a nivel mundial y nacional, siendo frecuentemente ingerida cruda, lo que incrementó el riesgo de transmisión de patógenos cuando las condiciones de producción no garantizaron su inocuidad (Silva et al., 2011; Di Benedetto, 2005).

Diversos estudios reportaron que la lechuga presentó niveles elevados de coliformes totales y fecales cuando fue cultivada con agua de riego contaminada, constituyéndose en un importante vehículo de enfermedades transmitidas por alimentos (Rodríguez et al., 2015; Martínez et al., 2020).

Desde el punto de vista fisiológico, la lechuga resultó particularmente sensible a la calidad del agua utilizada en sistemas hidropónicos, debido a su rápido crecimiento, su sistema radicular expuesto y su dependencia directa de la solución nutritiva. La teoría de la cohesión y tensión explicó que cualquier alteración en la calidad del agua podía afectar el transporte de agua y nutrientes a través de la xilema, repercutiendo en el desarrollo de la planta y en la

calidad microbiológica del producto final (Ha et al., 2022).

Asimismo, desde la perspectiva de la teoría de sistemas abiertos, el sistema hidropónico funcionó como un sistema dinámico en constante interacción con el entorno, donde la calidad del agua representó un insumo crítico que condicionó el equilibrio interno del sistema y la sanidad del cultivo (Navarro, 2001; Espinoza, 2007).

La teoría microbiana sustentó la necesidad de controlar la presencia de microorganismos patógenos en el agua de riego, dado que estos agentes constituyeron la causa directa de múltiples enfermedades transmitidas por alimentos. La detección de coliformes totales y fecales se estableció como un indicador fundamental de contaminación microbiológica, permitiendo evaluar el riesgo sanitario asociado al consumo de hortalizas frescas (Tortora et al., 2007; Páez, 2009). En este sentido, el cumplimiento de los criterios microbiológicos establecidos en la norma sanitaria peruana NTS N.º 071-MINSA/DIRESA.V.01 resultó esencial para garantizar la seguridad alimentaria.

En consecuencia, la presente investigación se justificó por la necesidad de generar evidencia científica sobre la efectividad del método SODIS aplicado al tratamiento de aguas residuales utilizadas en sistemas hidropónicos, evaluando su impacto sobre la calidad microbiológica del cultivo

de lechuga en un contexto altoandino.

El estudio aportó información relevante para la toma de decisiones en el manejo sostenible del recurso hídrico, la producción segura de alimentos y el diseño de estrategias de bajo costo orientadas a comunidades con limitaciones de acceso a tecnologías convencionales de tratamiento de agua.

Por ello, la presente investigación resultó relevante desde el punto de vista científico, social y ambiental, al generar evidencia empírica sobre el efecto de la calidad del agua tratada mediante desinfección solar en los parámetros microbiológicos del cultivo hidropónico de la lechuga (*Lactuca sativa*), utilizando el efluente de la PTAR-Yauli durante el año 2024.

Los resultados obtenidos contribuyeron al fortalecimiento del conocimiento sobre el reúso seguro de aguas residuales en la agricultura, promoviendo prácticas sostenibles que respondieron a la problemática hídrica local y nacional, y aportaron insumos técnicos para la toma de decisiones en políticas de gestión del recurso hídrico y seguridad alimentaria.

Metodología

Ámbito del estudio

El estudio se llevó a cabo en el Distrito de Yauli, Provincia y Región Huancavelica-Perú, ubicado a 15 kilómetros (km) al este de la ciudad de Huancavelica, geográficamente en las coordenadas

UTM Este 516 184.00 metros y Norte 8 588 698.00 metros, a una altitud de 3.382 metros sobre nivel del mar (msnm), bajo el sistema de referencia WGS 1984-UTM, con temperaturas diurnas hasta 24 grados Celsius (°C), nocturnas alrededor de 0°C.

Tipo de investigación

La investigación fue de tipo aplicada, dado que se orientó a la utilización práctica de los conocimientos científicos para resolver un problema específico relacionado con la mejora de la calidad microbiológica del agua empleada en cultivos hidropónicos de lechuga mediante la aplicación del método de desinfección solar. Los resultados obtenidos tuvieron potencial de aplicación directa en contextos agrícolas reales, contribuyendo a la seguridad alimentaria y al uso sostenible del recurso hídrico.

Nivel de investigación

El estudio correspondió al nivel explicativo, ya que analizó la relación de causa-efecto entre la aplicación de la desinfección solar del agua y los parámetros microbiológicos del cultivo hidropónico de lechuga (*Lactuca sativa*), con la finalidad de explicar el impacto del tratamiento sobre la calidad microbiológica del producto agrícola.

Diseño de investigación

El diseño de investigación fue preexperimental, con un esquema de pretest y postest aplicado a un solo grupo. Se evaluó la

calidad microbiológica de la lechuga cultivada con efluente del Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Yauli antes y después de la aplicación del tratamiento de desinfección solar del agua. El diseño se estructuró de la siguiente manera:

G1: O1 – X – O2

Donde:

O₁ = Corresponde al pretest

X = Tratamiento SODIS

O₂ = Postest

Población, muestra y muestreo

La población estuvo constituida por todas las lechugas hidropónicas cultivadas con el efluente del PTAR Yauli Huancavelica. La muestra estuvo conformada por 24 unidades de lechuga hidropónica, distribuidas en 12 muestras para el pretest y 12 muestras para el postest. El muestreo fue no probabilístico por conveniencia, seleccionando las muestras de acuerdo con criterios de accesibilidad y pertinencia establecidos por el investigador.

Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Se emplearon las técnicas de observación, mediciones directas, fichaje y pruebas de laboratorio. La observación se realizó mediante las mediciones directas en campo para registrar los parámetros físicoquímicos del agua (temperatura, pH, conductividad y turbidez). El fichaje permitió el

registro sistemático de los datos obtenidos. Las pruebas de laboratorio se utilizaron para determinar los parámetros microbiológicos del agua y de la lechuga hidropónica, específicamente coliformes fecales y totales.

Los instrumentos utilizados incluyeron un multiparámetro de marca HANNA para la medición de temperatura, pH y conductividad eléctrica, y un nefelómetro HANNA para la medición de la turbidez. Los análisis microbiológicos se realizaron en un laboratorio acreditado, empleando un baño de agua agitada con termorregulación y una estufa incubadora, siguiendo los métodos establecidos por SMEWW-APHA-AWWA-WEF y la técnica del Número Más Probable (NMP) recomendada por la ICMSF.

Procesamiento y análisis de datos

Los datos recolectados fueron procesados mediante los programas Microsoft Excel e IBM SPSS Statistics. Se realizaron análisis descriptivos para la caracterización de las variables, incluyendo el cálculo de medias, desviación estándar y frecuencias.

Resultados

En la Tabla 1 se presentan los resultados del análisis de los parámetros físicoquímicos y microbiológicos del agua antes y después del tratamiento mediante el método SODIS, comparados con los límites establecidos en el DS N.º 004-2017-MINAM y el Decreto Supremo N.º

1076/2015.

Respecto a la temperatura, se registró un valor de 16,7 °C en la muestra de agua pretratamiento (efluente de la PTAR-Yauli), el cual se incrementó ligeramente a 17 °C en el postratamiento mediante SODIS. Ambos valores se encontraron por debajo de los límites máximos establecidos por la normativa, lo que indica que el tratamiento no generó alteraciones térmicas significativas en el agua.

En cuanto al pH, el valor inicial fue de 7,36, mientras que después del tratamiento aumentó a 7,64. Estos resultados evidencian que el pH del agua se mantuvo dentro de los rangos permisibles establecidos por ambas normativas (6,5–8,5 y 6–9), indicando condiciones de neutralidad adecuadas y una ligera mejora hacia valores óptimos tras la aplicación del tratamiento SODIS.

La conductividad eléctrica mostró una reducción considerable, pasando de 749,3 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el pretratamiento a 452,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el postratamiento. Esta disminución refleja una reducción en la concentración de sales disueltas, manteniéndose en ambos casos dentro de los límites normativos permitidos, lo que sugiere una mejora en la calidad fisicoquímica del agua tratada.

En relación con la turbiedad, se observó una reducción de 25,7 UNT a 22,7 UNT después del tratamiento. Aunque ambos valores se encontraron

por debajo del límite máximo establecido por el DS N.º 004-2017-MINAM (100 UNT), la disminución registrada evidencia un efecto positivo del tratamiento SODIS en la clarificación del agua.

Desde el punto de vista microbiológico, los coliformes fecales presentaron valores inferiores a 1,80 NMP/100 ml tanto antes como después del tratamiento, situándose muy por debajo de los límites máximos permisibles establecidos por ambas normativas. Este resultado indica una baja carga fecal y un adecuado control microbiológico. Asimismo, los coliformes totales disminuyeron de 33 NMP/100 ml en el pretratamiento a 17 NMP/100 ml en el postratamiento, evidenciando una reducción significativa de la carga bacteriana y valores ampliamente inferiores al límite de 5000 NMP/100 ml establecido por el Decreto Supremo N.º 1076/2015.

Parámetro	Unidad	Muestra de agua		DS	Decreto
		Pre tratamiento (efluente PTAR-Yauli)	Post tratamiento (SODIS)	Nº004 2017 MINAM	1076/ 2015
Temperatura	°C	16.7	17	21	28
pH	Unidad de pH	7.36	7.64	6.5 – 8.5	6 - 9
Conductividad	$\mu\text{S}/\text{cm}$	749.3	452.6	2500	50 - 1000
Turbiedad	UNT	25.7	22.7	100	–
Coliformes fecales	(NMP/100ml)	<1.80	<1.80	2000	1000
Coliformes totales	(NMP/100ml)	33	17	–	5000

Tabla 1. Resultado de análisis de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua

En la Tabla 2 se presentan los resultados del análisis y comparación de coliformes fecales en muestras de lechuga hidropónica cultivadas con

agua proveniente del efluente del PTAR-Yauli, antes (pre tratamiento) y después (post tratamiento) del proceso de tratamiento del agua. Los resultados evidenciaron diferencias claras en la carga microbiológica entre ambas condiciones.

En las muestras pre tratamiento, los valores de coliformes fecales oscilaron entre 3 y 15 NMP/g, observándose una variabilidad moderada entre las doce muestras analizadas. Los mayores valores se registraron en las muestras M-8 (15 NMP/g), M-11 (11 NMP/g) y M-12 (9 NMP/g), lo que indica una mayor presencia de contaminación fecal asociada al uso del efluente sin tratamiento previo. No obstante, aun estos valores se mantuvieron por debajo del límite máximo permisible de <100 NMP/g, establecido por la Norma Sanitaria NTS N.º 071-MINSA/DIRESA V.01 y los criterios del ICMSF, cumpliendo formalmente con la normativa vigente.

En contraste, en todas las muestras post tratamiento los niveles de coliformes fecales fueron inferiores a 3 NMP/g, valor correspondiente al límite de detección del método analítico empleado. Este resultado evidenció una reducción sustancial y homogénea de la carga bacteriana en el total de las muestras evaluadas, independientemente del valor inicial registrado en la fase pre tratamiento.

Muestra	Coliformes fecales en lechugas hidropónicas		Norma NTS N.º 071-MINSA/DIRESA.
	Pre tratamiento (NMP/g)	Post tratamiento (NMP/g)	
M-1	4	<3	<100
M-2	3	<3	<100
M-3	3	<3	<100
M-4	3	<3	<100
M-5	7	<3	<100
M-6	3	<3	<100
M-7	4	<3	<100
M-8	15	<3	<100
M-9	3	<3	<100
M-10	3	<3	<100
M-11	11	<3	<100
M-12	9	<3	<100

Tabla 2. Análisis y comparación de coliformes fecales en muestras de lechuga hidropónica cultivados con agua pre y post tratamiento proveniente del efluente del PTAR-Yauli.

En la Tabla 3 se presentó el análisis y comparación de coliformes totales en muestras de lechuga hidropónica cultivadas con agua proveniente del efluente del PTAR-Yauli, antes y después del tratamiento. Los resultados evidenciaron que, en la etapa de pretratamiento, las concentraciones de coliformes totales fueron elevadas en todas las muestras analizadas, registrándose valores que oscilaron entre 15.000 y 21.000 NMP/g, lo cual reflejó una alta carga microbiológica inicial asociada al uso de agua sin tratamiento adecuado. Estas concentraciones superaron ampliamente el límite máximo permisible establecido por la Norma Sanitaria NTS N.º 071-MINSA/DIRESA V.01 y los criterios de la ICMSF

(<100 NMP/g), indicando una condición no apta para el consumo humano.

Posterior a la aplicación del tratamiento del efluente, se observó una reducción significativa de los coliformes totales en todas las muestras evaluadas. En la etapa de postratamiento, los valores se situaron entre 900 y 2.100 NMP/g, lo que representó una disminución sustancial respecto a los niveles iniciales. Este comportamiento fue consistente en las doce muestras, evidenciando la efectividad del tratamiento en la reducción de la carga bacteriana.

No obstante, pese a la disminución lograda, los valores de coliformes totales en las lechugas hidropónicas continuaron excediendo el límite normativo (<100 NMP/g) en el 100 % de las muestras analizadas. Este resultado permitió interpretar que, si bien el tratamiento del efluente del PTAR-Yauli contribuyó de manera significativa a la reducción de coliformes totales, no fue suficiente para garantizar el cumplimiento de los estándares sanitarios exigidos, lo que sugiere la necesidad de optimizar los procesos de tratamiento o incorporar etapas adicionales de desinfección para

asegurar la inocuidad microbiológica del producto final.

Muestra	Coliformes totales en lechugas hidropónicas		Norma NTS N° 071-MINSA/DIRESA. V.01 y ICMSF
	Pre tratamiento (NMP/g)	Post tratamiento (NMP/g)	
M-1	20000	1500	<100
M-2	20000	1500	<100
M-3	15000	900	<100
M-4	15000	1500	<100
M-5	20000	900	<100
M-6	15000	2000	<100
M-7	20000	1500	<100
M-8	21000	2000	<100
M-9	20000	2100	<100
M-10	15000	2000	<100
M-11	21000	900	<100
M-12	20000	2000	<100

Tabla 3. Análisis y Comparación de coliformes totales en muestras de lechuga hidropónica cultivados con agua pre y post tratamiento proveniente del efluente del PTAR-Yauli.

Discusión

Los resultados obtenidos fueron coherentes con lo reportado por Ibarra et al., (2021), quienes evidenciaron que el uso de aguas residuales urbanas tratadas en sistemas hidropónicos permitió mantener niveles de coliformes dentro de rangos aceptables, cumpliendo con estándares internacionales de calidad microbiológica.

En el presente estudio, si bien se observó una reducción significativa de la carga de coliformes totales tras la aplicación del tratamiento, los valores finales no alcanzaron los límites establecidos por la normativa sanitaria vigente, lo que permitió interpretar que la eficacia del tratamiento fue parcial

y dependiente de las condiciones específicas del efluente y del sistema de cultivo empleado.

Asimismo, los hallazgos mostraron concordancia con lo señalado por Carreño (2021), quien demostró que la aplicación del tratamiento solar en regiones altoandinas contribuyó a mejorar la calidad microbiológica del agua de riego y, en consecuencia, la seguridad de los cultivos. En el contexto del presente estudio, la disminución de coliformes totales evidenció el potencial del tratamiento aplicado para reducir la contaminación microbiológica, especialmente en entornos con limitaciones en el acceso a tecnologías convencionales de tratamiento de agua.

De manera similar, los resultados coincidieron con lo reportado por Guanilo et al., (2021), quienes concluyeron que el uso de agua tratada permitió reducir de forma significativa la carga microbiológica en lechugas hidropónicas, validando el empleo de tratamientos accesibles y sostenibles en escenarios de escasez hídrica. No obstante, a diferencia de dichos estudios, los niveles de coliformes obtenidos en esta investigación permanecieron por encima de los valores permisibles, lo que sugiere que la eficiencia del tratamiento puede verse condicionada por la carga inicial de contaminación, el tiempo de exposición y las características fisicoquímicas del agua.

En contraste, los resultados no se alinearon con los obtenidos por Asencios (2022), quien

determinó que la desinfección solar no fue eficaz para reducir los parámetros microbiológicos en cuerpos de agua superficial conforme a los estándares establecidos en la normativa peruana DS N.º 004-2017-MINAM, categoría 3.

Esta discrepancia pudo atribuirse al tipo de fuente hídrica evaluada, a las condiciones ambientales, así como a las diferencias metodológicas en la aplicación del tratamiento, lo que resaltó la necesidad de contextualizar el uso del método SODIS y adaptarlo a las características propias del entorno y del agua utilizada.

Finalmente, los resultados obtenidos permitieron reafirmar el potencial del método SODIS como una alternativa sostenible para mejorar la calidad microbiológica del agua de riego en cultivos hidropónicos. Sin embargo, también puso en evidencia la importancia de considerar factores adicionales y la implementación de tratamientos complementarios que permitan garantizar el cumplimiento de las normas de inocuidad alimentaria y asegurar la seguridad sanitaria del producto final.

Conclusiones

El tratamiento SODIS contribuyó a la mejora de la calidad fisicoquímica y microbiológica del agua, manteniendo todos los parámetros analizados dentro de los límites establecidos por la normativa vigente y reforzando su potencial como método

complementario de tratamiento de aguas residuales tratadas.

Los resultados indicaron que el tratamiento aplicado al efluente del PTAR-Yauli fue altamente efectivo para disminuir la concentración de coliformes fecales en el cultivo hidropónico de lechuga, logrando niveles microbiológicos considerablemente más bajos y con mayor margen de seguridad sanitaria. La reducción observada sugiere que el uso de agua post tratamiento contribuyó significativamente a mejorar la calidad microbiológica del producto agrícola, minimizando el riesgo potencial para la salud del consumidor y fortaleciendo la viabilidad del uso de efluentes tratados en sistemas hidropónicos bajo condiciones controladas.

El tratamiento del efluente del PTAR-Yauli permitió una reducción considerable de los coliformes totales en las lechugas hidropónicas; sin embargo, los niveles obtenidos después del tratamiento continuaron superando los límites establecidos por la normativa sanitaria vigente, lo que evidencia que el proceso aplicado resulta insuficiente para garantizar la inocuidad microbiológica del producto y requiere mejoras o etapas adicionales de desinfección.

Agradecimientos

Al fomento de la investigación formativa del Vicerrectorado de Investigación de la Universidad

Nacional de Huancavelica, por brindar el financiamiento de la subvención del proyecto de tesis.

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener conflicto de interés en relación con el presente trabajo de investigación.

Referencias

- Albuja, V., Andrade, J., Lucano, C., & Rodriguez, M. (2021). Comparativa de las ventajas de los sistemas hidropónicos como alternativas agrícolas en zonas urbanas. *Minerva*, II (4), 45-54. Documento en línea. Disponible doi: 10.47460/minerva.V2I4.26
- Asencios, J. (2022). Eficacia de un sistema de desinfección solar en la reducción de contenido microbiológico de cuerpos de agua superficial. Tesis de pregrado. Universidad de Huánuco, Huánuco. Documento en línea. Disponible <http://distancia.udh.edu.pe/handle/123456789/3563>
- Carreño, H. (2021). Agua de riego no restringido y calidad microbiológica de las lechugas (*Lactuca sativa*) que se cultiva en la provincia de Barranca, Región Lima-2020. Tesis de doctorado. Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, Huacho. Documento en línea. Disponible <http://repositorio.unjfsc.edu.pe/handle/20.500.14067/5582>
- Di Benedetto, M. (2005). Impactos ambientales del uso de aguas residuales en la agricultura. *Environmental Studies*, 17(1), 105-113.
- Díaz, R., Pérez, L., & Gómez, N. (2024). Impact of wastewater treatment on hydroponic crop health: Case studies. *Environmental Impact Reports*, 29(1), 67-75.

- Espinoza, S. (2007). Water management in arid regions for sustainable agriculture. *Water Resources Review*, 8(4), 45-52.
- FAO. (2017). *The State of Food and Agriculture 2017: Leveraging food systems for inclusive rural transformation*. Food and Agriculture Organization.
- Fernández, A. (2017). *Aguas Residuales en el Perú, Problemática y uso en la agricultura*. Lima.
- García-Gil, J. M., Torres, M. L., & Ruiz, F. R. (2021). Assessing solar disinfection in rural water systems. *Sustainable Water Management*, 33(2), 144-152.
- Gilsanz, E. (2007). *Agricultural sustainability in modern farming techniques*. Springer.
- Gobierno Regional de Huancavelica. (2017). *Informe sobre la escasez hídrica en Huancavelica y sus impactos en la agricultura*. Gobierno Regional de Huancavelica.
- González, A. (2012). *Contaminación del agua en áreas rurales de América Latina*. Editorial Universitaria.
- Guanilo, R., Cornejo, J., Zamora, C., Quevedo, T., & García-Seminario, R. (2021). Microorganismos eficientes en la descontaminación de agua subterránea y su implicancia en la producción y calidad de lechuga hidropónica. *Manglar*, 18(1), 77-82. Documento en línea. Disponible doi: <http://dx.doi.org/10.17268/manglar.2021.010>
- Ha, L., Nguyen, T., & Kim, J. (2022). Theory of water transport in hydroponic systems. *Plant Physiology Reviews*, 12(3), 189-194.
- Hettiarachchi, H., & Ardekanian, R. (2017). Water quality management in irrigation systems. *International Journal of Water Resources*, 22(5), 134-142.
- Ibarra-Rondón, A., Fragoso-Castilla, P., Villero-Wolf, F., & Rodríguez-Jiménez, D. (2021). Efecto del uso de aguas residuales urbanas sobre el rendimiento y la calidad microbiológica del pimentón (*Capsicum annun L.*) cultivado en hidroponía. *Información tecnológica*, 32, 93-100. Documento en línea. Disponible <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642021000600093>
- Magallanes, A. (2022). Evaluación productiva del cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum L.*) en dos sustratos sólidos bajo un sistema hidropónico NFT. Tesis doctoral. Universidad Agraria del Ecuador.
- Márquez-Bravo, A. (1998). *La depuración solar: Principios y aplicaciones prácticas*. Universidad Nacional de Bogotá.
- Martínez, A., López, R., & Vargas, S. (2020). Microbial risks in hydroponic lettuce: A case study in urban agriculture. *Journal of Public Health*, 41(2), 120-125.
- Meierhofer, C., & Wegelin, M. (2003). Solar disinfection for water quality improvement in developing countries. *Journal of Water Technology*, 56(3), 35-40.
- Moscoso, J. (2016). *Manual de buenas prácticas para el uso seguro y productivo de las aguas residuales domésticas*. Lima: Autoridad Nacional del Agua.
- Navarro, M. (2001). Theory of open systems in agricultural practices. *Agricultural Systems Theory*, 15(1), 70-78.
- Páez, A. (2009). Diseases related to microbiological contamination in agriculture. *Environmental Medicine Journal*, 22(3), 200-205.
- Park, Y., & Williams, K. (2024). Hidroponía orgánica: una revisión. *Scientia Horticulturae*, 304-4238. Documento en línea. Disponible doi: 10.1016/j.scienta.2023.112604.
- Prazeres, D. M. F., Santos, R. A., & Lima, S. P. (2017). Microbial reductions using solar disinfection methods. *Water Purification Journal*, 10(2), 50-58.
- Rodríguez, L., Sánchez, C., & Torres, P. (2015). Contaminación microbiológica en lechugas: Un análisis desde el uso de aguas residuales. *Food Science Journal*, 19(4), 45-50.



Sant'Ana, A. S. (2023). Microbial contamination and safety in fresh produce: A review. *Food Safety Journal*, 45(2), 112-120.

Semino, G. (2015). Desinfección solar para la mejora de la calidad del agua: Un enfoque accesible. *International Environmental Journal*, 28(4), 80-89.

Serna, C. (2018.a). Evaluación del riego con agua gris doméstica para un cultivo hidropónico de lechuga (*Lactuca Sativa* L.). Tesis de maestría. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo. Documento en línea. Disponible <https://repositorio.chapingo.edu.mx/handle/123456789/1916>

Serna, C. (2018.b). Evaluation of treated gray water for hydroponic lettuce cultivation. *Journal of Environmental Science*, 11(3), 250-258.

Silva, G., Rodríguez, P., & Loaiza, V. (2011). Evaluación de la calidad microbiológica de cultivos hidropónicos. *Journal of Agricultural Sciences*, 32(5), 230-237.

Tortora, G. J., Derrickson, B. H., & Mescher, A. L. (2007). *Principles of Anatomy and Physiology* (12th ed.). McGraw-Hill.

Van, E., Blok, C., Voogt, W., & Waked, L. (2016). Water quality and salinity aspects in hydroponic cultivation. Wageningen UR Glastuinbouw.

