

Evaluación del Agua Residual Tratada para Uso en Riego Agrícola del Cultivo de Palma Africana *Elaeis guineensis* en la “Extractorora Agrícola Río Manso S.A. Planta Monterrey 2018”.

*Evaluation of Treated Wastewater for Use in Agricultural Irrigation of African Palm *Elaeis guineensis* Crops at the “Extractorora Agrícola Río Manso S.A. Monterrey Plant 2018”.*

Riofrio-Cedeño, Evelin Carolina¹; Cobeña-Chávez, Mirna María²; Pérez-Bravo, Ángel Vicente³; Bello-Moreira, Italo Pedro⁴.

Cita: Riofrio-Cedeño, E. C., Cobeña-Chávez, M. M., Pérez-Bravo, Ángel V., & Bello-Moreira, I. P. (2025). Evaluación del Agua Residual Tratada para Uso en Riego Agrícola del Cultivo de Palma Africana *Elaeis guineensis* en la “Extractorora Agrícola Río Manso S.A. Planta Monterrey 2018”. *Innova Science Journal*, 3(4), 501-522. <https://doi.org/10.63618/omd/isj/v3/n4/154>

Recibido: 23/07/2025
Aceptado: 06/10/2025
Publicado: 31/10/2025



Copyright: © 2025 por los autores. Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la Licencia Creative Commons, Atribución-NoComercial 4.0 Internacional. (CC BY-NC).

(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

¹ Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí (ULEAM); Ecuador, Manta; <https://orcid.org/0009-0004-9308-7068>; carolinariofrio15@gmail.com

² Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí (ULEAM); Ecuador, Manta; <https://orcid.org/0009-0005-9383-4550>; mirnacobenam04@gmail.com

³ Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí (ULEAM); Ecuador, Manta; <https://orcid.org/0009-0001-1091-3052>; angel.perez@uleam.edu.ec

⁴ Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí (ULEAM); Ecuador, Manta; <https://orcid.org/0000-0003-0230-0632>; italop.bello@uleam.edu.ec

¹ Autor Correspondencia

 <https://doi.org/10.63618/omd/isj/v3/n4/154>

Resumen: El cultivo de palma africana requiere gran cantidad de agua, por lo que se evaluó el uso de agua residual tratada para mejorar su eficiencia hídrica en la Extractora Agrícola Río Manso S.A., planta Monterrey. Se compararon una parcela testigo y una experimental, esta última irrigada con agua residual tratada mediante aspersión tipo cañón. Se realizaron análisis de agua, suelo y potencial de aceite. Los resultados mostraron un aumento del pH en la parcela experimental, volviéndose alcalino, sin cambios significativos en nutrientes, humedad o capacidad del suelo. En cuanto a la producción, no se encontraron diferencias en cantidad, peso de los racimos ni en el potencial de aceite, manteniéndose ambos dentro del rango permitido.

Palabras clave: Palma africana; Agua residual tratada; Eficiencia hídrica; Producción de racimos; pH del suelo.

Abstract: African palm cultivation requires large amounts of water, so the use of treated wastewater was evaluated to improve water efficiency at the Extractor Agrícola Río Manso S.A. plant in Monterrey. A control plot was compared with an experimental plot the latter irrigated with treated wastewater using a cannon-type sprinkler. Water, soil, and oil potential analyses were performed. The results showed an increase in pH in the experimental plot, which became alkaline, with no significant changes in nutrients, moisture, or soil capacity. In terms of production, no differences were found in quantity, bunch weight, or oil potential, both of which remained within the permitted range.

Keywords: African palm; Treated wastewater; Water efficiency; Cluster production; Soil pH.

1. Introducción

El crecimiento sostenido del sector agroindustrial, especialmente en países en vías de desarrollo, ha generado una mayor presión sobre los recursos naturales y ha intensificado la necesidad de implementar prácticas de producción más limpia. En este contexto, el manejo adecuado de las aguas residuales constituye uno de los desafíos más relevantes tanto a nivel ambiental como productivo. Las aguas residuales, entendidas como aquellas que han sido utilizadas en actividades humanas y que, debido a la presencia de materia orgánica, compuestos químicos o microorganismos, representan un riesgo potencial para la salud humana y el medio ambiente (Rivas, 1978), deben ser tratadas antes de su reutilización o vertido. Estas pueden tener origen doméstico, industrial, agrícola o atmosférico, y presentan características que varían ampliamente en función de su procedencia.

En la industria agroalimentaria, y en particular en el proceso de extracción de aceite de palma, el tratamiento de los efluentes cobra especial importancia debido a la elevada carga orgánica que estos presentan. Aunque el proceso extractivo es principalmente mecánico y no involucra agentes tóxicos ni metales pesados, las aguas residuales generadas contienen cantidades significativas de sólidos, aceites y grasas que requieren ser estabilizados mediante procesos biológicos. Las lagunas de oxidación, tanto anaerobias como aerobias, son comúnmente utilizadas en estas industrias debido a su eficiencia y bajo costo operativo (Cenipalma, 1996). Las lagunas anaerobias permiten la reducción de la carga orgánica en condiciones de bajo oxígeno disuelto, mientras que las lagunas aerobias promueven la oxidación de los compuestos orgánicos con la ayuda de bacterias aerobias y algas, bajo condiciones controladas de oxigenación (Díaz et al., 2002; Gómez, 1999).

En paralelo a la gestión de residuos, la necesidad de optimizar el uso del recurso hídrico en la agricultura ha incentivado la exploración de alternativas de riego sostenibles, como el uso de aguas residuales tratadas. Esta práctica, cuando es adecuadamente controlada, puede contribuir a reducir el consumo de agua potable, disminuir la carga contaminante hacia los cuerpos receptores y aportar nutrientes al suelo, favoreciendo el desarrollo de los cultivos. No obstante, su implementación debe estar sujeta a rigurosos estudios que evalúen los efectos a corto, mediano y largo plazo sobre el suelo, el cultivo y la calidad del producto final.

Un cultivo particularmente relevante en este análisis es la palma africana (*Elaeis guineensis*), planta oleaginosa perenne originaria del Golfo de Guinea y ampliamente cultivada en regiones tropicales. En Ecuador, este cultivo ha tenido un notable crecimiento desde la década de 1970, llegando a representar una importante fuente de ingresos para diversas zonas del país. Según el IICA (2006), la palma africana tiene una alta productividad en comparación con otros cultivos oleaginosos, y puede alcanzar rendimientos de hasta cuatro toneladas de aceite por hectárea durante su ciclo de vida productiva. Su adaptabilidad al clima cálido y húmedo del Ecuador ha permitido su expansión, alcanzando más de 319.000 hectáreas cultivadas a nivel nacional (Lasso, 2018).

La Extractora Agrícola Río Manso S.A., planta Monterrey, dedicada al procesamiento de frutos de palma africana, ha implementado un sistema de tratamiento de aguas residuales mediante lagunas de oxidación, con el propósito de reducir el impacto

ambiental de sus efluentes y evaluar su potencial reutilización en riego agrícola. El proceso industrial en esta planta incluye diversas etapas, desde la recepción y esterilización de los frutos, hasta la clarificación del aceite y la recuperación de almendras, cada una de las cuales genera residuos líquidos y sólidos que deben ser gestionados adecuadamente para mantener estándares ambientales aceptables (Torres, 2017).

En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo evaluar el efecto del uso de agua residual tratada proveniente de la laguna de oxidación número ocho de la empresa Río Manso S.A., en las propiedades físico-químicas del suelo y en las características productivas del cultivo de palma africana. Se plantea un enfoque comparativo entre una parcela experimental, irrigada con agua residual tratada mediante aspersión tipo cañón, y una parcela testigo con manejo convencional, con el fin de determinar si el riego con este tipo de agua influye en parámetros como el pH, la conductividad eléctrica, la humedad, la disponibilidad de nutrientes, y, especialmente, en la cantidad, peso y calidad de los racimos de fruto fresco y su contenido de aceite.

Los resultados de este estudio permitirán establecer criterios técnicos y ambientales para el uso responsable del recurso hídrico en plantaciones de palma africana, y aportar evidencia científica que respalde prácticas agrícolas sostenibles bajo un modelo de economía circular, en el cual los residuos generados en el proceso industrial puedan ser reincorporados al sistema productivo de forma segura y eficiente.

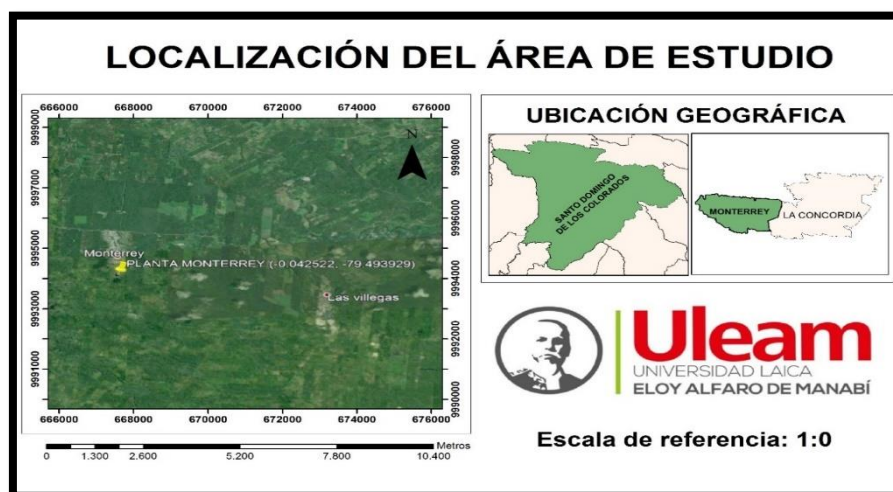
2. Materiales y Métodos

2.1. Ubicación y área de estudio

La investigación se realizó en la Extractora Agrícola Río Manso S.A. Planta Monterrey, la misma que se encuentra ubicada en el sector Monterrey, de la ciudad de Santo Domingo de los Tsáchilas.

Figura 1.

Ubicación de la Extractora Agrícola Río Manso S.A.



Nota. Ubicada en el sector Monterrey, de la ciudad de Santo Domingo de los Tsáchilas

2.2. Métodos procedimientos e instrumentos de recopilación de datos.

Para el desarrollo de esta investigación se utilizaron diferentes procesos, metodologías y materiales que permitieron recolectar los datos necesarios cuyo fin fue alcanzar los objetivos planteados direccionados a conocer la calidad del efluente de sistema de tratamiento de agua residual, el análisis de suelo, cantidad de macro y micro nutrientes del suelo y las características en la producción de los racimos (frutos).

2.2.1. Métodos de monitoreo

La toma de muestra se realizó de una manera puntual en relación a los objetivos planteados, y simultáneamente en diferentes puntos en la zona de estudio.

Con relación a la calidad del efluente se realizaron 6 muestras las mismas que fueron recolectadas en envases de vidrios totalmente limpios. Los datos recolectados para los respectivos análisis de suelo se realizaron con un total de 8 muestras las cuales se recolectaron en fundas, mientras que para la densidad del suelo se utilizó en dos cilindros.

Con relación a la calidad del racimo (frutos) se tomaron 4 muestras directamente cortados de la palma africana.

2.2.2. Procedimiento de toma de muestras

- **Análisis del agua**

- Los envases de vidrios fueron llenados por completo para luego ser llevados al laboratorio para los respectivos estudios.
- En el área de muestra se consideró en la laguna 7 y 8 de la empresa Extractora Agrícola Rio Manso S.A.- Planta Monterrey.

- **Análisis del suelo**

- Para la recolección de la muestra del suelo las fundas se llenaron hasta la mitad (un total de 6 fundas por muestra), luego las muestras pasaron al laboratorio de la empresa, para su respectivo análisis, se midieron datos como el pH, conductividad, humedad y densidad.
- Para medir la conductividad se utilizó 20gr de suelo y se lo disolvió con 20ml de agua destilada, logrando una homogeneidad.
- Lo que corresponde al análisis de humedad se tomaron 10gr de suelo el cual pasó al horno a secar a 120°, y se esperó un tiempo de dos horas para tener su resultado, el mismo que se presenta en el siguiente apartado de este documento.
- En lo que respeta a la densidad del suelo se utilizaron dos cilindros ya que fueron dos parcelas de estudio, la experimental y la testigo, el cilindro se colocó en el suelo hasta lograr su compactación, posteriormente fue llevada al laboratorio en donde se analizó toda la masa que contiene el cilindro.

- **Análisis del aceite**

- Para el respectivo análisis de aceite, se cortaron los racimos de la palma luego pasaron por la zona de esterilización, seguidamente se desgranaron y se

separaron los frutos externos e internos, posteriormente se sacó la pulpa y la nuez de los frutos, la pulpa pasó al secado por 5 horas y luego al equipo soxhlet (material de vidrio utilizado para la extracción de compuestos), para la extracción del aceite durante un día, para así proceder a realizarle el análisis de humedad y la acidez del aceite, luego se saca las fórmulas para obtener el potencial de aceite que determinará la calidad de éste.

3. Resultados

3.1. Análisis de los datos obtenidos por el laboratorio de la empresa.

Tabla 1.

Análisis de la laguna 7

ANÁLISIS DE AGUA LAGUNA 7	1ERA SEMANA OCTUBRE	2DA SEMANA OCTUBRE	3RA SEMANA OCTUBRE	4TA SEMANA OCTUBRE
PH	8,45	8,48	8,26	8,4
TEMPERATURA (°C)	27	27	27	27
SÓLIDOS TOTALES (mg/l)	7840	8280	9940	10440
SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS (mg/l)	7571	7654	7430	7718
SÓLIDOS TOTALES SUSPENDIDOS (mg/l)	268,8	625,6	2509,6	2721,6
ACEITES GRASAS (mg/l)	20	19,9	20	12,5
DQO (mg/l)	2457	2705	26,48	26,79
CAP. BUFFER	*	*	*	*
PERFIL LODOS	35	30	30	30

Nota. Se utilizó la piscina N.7 para el sistema de riego en la Parcela Experimental debido a que la piscina N.8 se encontraba en mantenimiento.

El valor de pH registrado en el mes de octubre se encuentra dentro del rango normal establecido (6–9), con un valor medido de 8,5, lo que indica que el parámetro está dentro de los límites permisibles para el uso de agua residual en riego agrícola.

De igual manera, la conductividad eléctrica (C.E.) cumple con el límite máximo permitido, conforme a lo establecido en la Tabla 4 del Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente (TULSMA), normativa ecuatoriana vigente. Asimismo, no se evidencia presencia de aceites y grasas, de acuerdo con lo estipulado en la Tabla 3 del mismo cuerpo normativo.

3.1.2. Resultados del análisis de agua de la laguna 8 en el mes de noviembre

Tabla 2.

Análisis de la laguna 8

ANÁLISIS DE AGUA LAGUNA 8	1ERA SEMANA NOVIEMBRE	2DA SEMANA NOVIEMBRE
PH	8,47	8,6
TEMPERATURA (°C)	27	27
SÓLIDOS TOTALES (mg/l)	10240	11900
SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS (mg/l)	8147	8397
SÓLIDOS TOTALES SUSPENDIDOS (mg/l)	2093	3503

ACEITES GRASAS (mg/l)	0	0
DQO (mg/l)	2604	2434
CAP. BUFFER	*	*
PERFIL LODOS	0	0

Nota. Elaboración propia

Durante el mes de noviembre, el valor de pH se mantiene dentro del rango normal establecido (6–9), registrando valores entre 8,5 y 8,6, lo que indica que el parámetro cumple con los límites permisibles para el uso de agua residual en riego agrícola.

De igual manera, la conductividad eléctrica (C.E.) se encuentra dentro del límite permitido, conforme a lo dispuesto en la Tabla 4 del Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente (TULSMA). Asimismo, no se detecta presencia de aceites y grasas, en concordancia con lo estipulado en la Tabla 3 del mismo cuerpo normativo.

3.1.3. Resultados de análisis de laboratorio de Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias – INIAP QUEVEDO

Tabla 3.

Análisis de laboratorio INIAP QUEVEDO

ANÁLISIS DE LABORATORIO INIAP- LAGUNA N.8		
PARÁMETROS	RESULTADOS LABORATORIO DEL INIAP DE QUEVEDO	LÍMITES PERMISIBLES LIBRO TULSMA TABLA 3
pH	8.2	6-9
BORO	2	0.75
COBRE	4	0.2
HIERRO	14	5.0
MANGANESO	1	0.2
ANÁLISIS DE LABORATORIO INIAP- LAGUNA N.8		
PARÁMETROS	RESULTADOS LABORATORIO DEL INIAP DE QUEVEDO	LÍMITES PERMISIBLES LIBRO TULSMA TABLA 4
Conductividad eléctrica (C.E)	13.9	>3.0
Nitrógeno	0.20	>30

Nota. Elaboración propia

El análisis de los parámetros físico-químicos de la Laguna N.º 8 demostró que los siguientes elementos fueron comparados con los límites establecidos en las Tablas 3 y 4 del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente (TULSMA):

- **Macronutrientes y micronutrientes:** Los valores de N (Nitrógeno), P (Fósforo), K (Potasio), Ca (Calcio), Mg (Magnesio), S (Azufre), Cu (Cobre), Fe (Hierro), Mn (Manganeso), B (Boro) y Zn (Zinc) se encuentran dentro de los límites permisibles establecidos por la normativa.
- **pH:** El valor de pH de la Laguna N.º 8 se encuentra dentro del rango permitido, según lo especificado en la Tabla 3 del TULSMA.
- **M.O. (Materia Orgánica):** Se observó un ligero incremento en el contenido de materia orgánica con respecto a los valores de referencia, sin que ello represente una alteración significativa en la calidad del agua.

- C.E. (Conductividad Eléctrica): El parámetro de conductividad eléctrica cumple con los límites permisibles establecidos en la Tabla 4 del TULSMA.

Los resultados obtenidos indican que la Laguna N.º 8 mantiene una condición estable en cuanto a la presencia de macro y micronutrientes esenciales en el agua. Únicamente se presentan variaciones leves en algunos parámetros, las cuales se encuentran dentro de los márgenes aceptables establecidos por el Libro VI del TULSMA.

3.1.4. Resultados del análisis de suelo

Tabla 4.

Caracterización de pH, conductividad, humedad del suelo previo a la aplicación del riego.

ANÁLISIS DEL SUELO INICIAL			
PARÁMETROS	PARCELA TESTIGO	PARCELA EXPERIMENTAL	LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES TABLA 7: INIAP (2013)
pH	6.66	7.46	6.6 a 7.5
CONDUCTIVIDAD	0.67	1.61	0 a 2
HUMEDAD	0.10	0.20	0.10 a 0.35
TEXTURA	FRANCO-LIMOSO	FRANCO-LIMOSO	FRANCO-LIMOSO

Nota. Elaboración propia

En la Tabla 4 se presentan los resultados del análisis de suelo realizado durante la primera semana de octubre, previo al riego en la parcela experimental. Los valores obtenidos muestran que el pH en ambas parcelas, tanto testigo como experimental, se encuentra dentro de los límites permisibles, registrándose 6,66 en la primera y 7,46 en la segunda. En cuanto a la conductividad eléctrica del suelo, se obtuvieron valores de 0,67 dS/m en la parcela testigo y 1,61 dS/m en la experimental, evidenciando condiciones estables y adecuadas para el desarrollo del cultivo. Respecto al contenido de humedad, la parcela testigo presentó 0,10 %, mientras que la experimental alcanzó 0,20 %, indicando una ligera diferencia atribuible a la variabilidad del riego. Ambas parcelas presentan una textura franco limosa, característica que favorece la retención de agua y nutrientes, contribuyendo a un buen comportamiento físico-químico del suelo.

3.1.5. Análisis del suelo durante la aplicación del riego en la parcela testigo

Tabla 5.

Resultados del pH de la parcela testigo

ANÁLISIS DEL SUELO – pH		LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES TABLA 7: INIAP (2013)
Muestras	pH	
Semana 1	7.40	6.6 a 7.5
Semana 2	7,38	
Semana 3	7,39	
Semana 4	7,01	
Semana 5	7,50	
Semana 6	7,42	

Nota. Elaboración propia

En los análisis realizados desde la segunda semana de octubre hasta la tercera semana de noviembre, correspondientes a la parcela testigo, se determinó que el pH del suelo se mantuvo estable y dentro de un rango neutro, con valores comprendidos entre 7,01 y 7,50, lo que indica condiciones adecuadas para el desarrollo de los cultivos y la disponibilidad equilibrada de nutrientes.

Tabla 6.

Resultados de la conductividad parcela testigo

ANÁLISIS DEL SUELO – Conductividad		
Muestras	Conductividad (dS/m)	LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES TABLA 7: INIAP (2013)
Semana 1	0,93	0 a 2
Semana 2	0,87	
Semana 3	1,37	
Semana 4	1,09	
Semana 5	1,55	
Semana 6	1,55	

Nota. Elaboración propia

Con respecto a la conductividad eléctrica de la parcela testigo, esta se mantuvo en un valor promedio de 1,55 dS/m, registrándose los niveles más altos durante la quinta y sexta semana del período de monitoreo, lo que indica una ligera variación dentro del rango considerado adecuado para el desarrollo del cultivo.

Tabla 7.

Resultados de la humedad del suelo

ANÁLISIS DEL SUELO – Humedad		
Muestras	Humedad (%)	LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES TABLA 7: INIAP (2013)
Semana 1	0,26	0.10 a 0.35
Semana 2	0,23	
Semana 3	0,25	
Semana 4	0,29	
Semana 5	0,25	
Semana 6	0,25	

Nota. Elaboración propia

La humedad del suelo en la parcela testigo, durante las seis semanas de evaluación, se mantuvo en un rango de 0,23 % a 0,29 %, evidenciando valores estables de acuerdo con los cuadros comparativos. Este comportamiento refleja una adecuada disponibilidad de agua en el suelo, factor fundamental para el desarrollo óptimo del cultivo de palma, ya que influye directamente en los procesos fisiológicos y en la absorción de nutrientes.

Tabla 8.

Resultados de la capacidad de campo de la parcela testigo

ANÁLISIS DEL SUELO – Capacidad de campo		
Muestras	Capacidad de campo (C.C %)	LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES, Tabla 1: MANEJO DE AGUA DE RIEGO
Semana 1	34	24 a 36
Semana 2	27	
Semana 3	31	
Semana 4	35	
Semana 5	33	
Semana 6	33	

Nota. Elaboración propia

La capacidad de campo de la parcela testigo, con valores comprendidos en un rango de 27 % a 35 % a lo largo de las seis semanas de estudio, se determinó a partir del cuadro de manejo del agua para riego, lo que permite evaluar la eficiencia en la retención de humedad del suelo y su disponibilidad para el desarrollo del cultivo.

Tabla 9.

Resultados del punto de marchitez de la parcela testigo

ANÁLISIS DEL SUELO – Punto de marchitez		
Muestras	Punto de marchitez (P.M%)	LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES, Tabla 1: MANEJO DE AGUA DE RIEGO
Semana 1	20	11 a 20
Semana 2	14	
Semana 3	17	
Semana 4	14	
Semana 5	20	
Semana 6	20	

Nota. Elaboración propia

Durante las seis semanas de evaluación, el punto de marchitez en la parcela testigo se mantuvo dentro del rango de 14 % a 20 %, conforme a lo establecido en el Libro de Manejo del Agua para Riego. Estos valores indican un comportamiento hídrico adecuado del suelo, permitiendo mantener un equilibrio entre la disponibilidad de agua y las necesidades del cultivo.

3.1.6. Análisis del suelo durante la aplicación del riego en la parcela experimental

Tabla 10.

Resultados del pH de la parcela experimental

ANÁLISIS DEL SUELO – PH		LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES TABLA 7: INIAP (2013)	
		Neutro	Ligeramente alcalino
Muestras	pH		
Semana 1	8,5		
Semana 2	8	6.6 a 7.5	7.5 a <8
Semana 3	8,48		
Semana 4	7,6		
Semana 5	8,1		
Semana 6	8,6		

Nota. Elaboración propia

Los resultados de los análisis realizados en la parcela experimental, desde la segunda semana de octubre hasta la tercera semana de noviembre, período durante el cual se efectuó el riego de las palmas mediante aspersores tipo cañón, evidenciaron valores de pH comprendidos entre 7,6 y 8,6, indicando una ligera tendencia hacia la alcalinidad, aunque dentro de los rangos permisibles para un adecuado desarrollo del cultivo.

Tabla 11.

Resultados de la conductividad de la parcela experimental

ANÁLISIS DEL SUELO – Conductividad		LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES TABLA 7: INIAP (2013)
Muestras	Conductividad (dS/cm)	
Semana 1	1,35	
Semana 2	1,55	0 a 2
Semana 3	1,72	
Semana 4	1,06	
Semana 5	0,99	
Semana 6	1,1	

Nota. Elaboración propia

La conductividad eléctrica en la parcela experimental presentó su valor más alto durante la tercera semana, alcanzando 1,72 dS/m, lo que evidencia una diferencia respecto a la parcela testigo. Sin embargo, este valor se mantiene dentro de los límites permisibles establecidos para suelos agrícolas (0–2 dS/m), conforme a la teoría que fundamenta esta investigación, indicando que las condiciones del suelo continúan siendo adecuadas para el desarrollo del cultivo.

Tabla 12.

Resultados de la humedad en la parcela experimental

ANÁLISIS DEL SUELO – Humedad		
Muestras	Humedad (%)	LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES TABLA 7: INIAP (2013)
Semana 1	0,28	<u>0.10 a 0.35</u>
Semana 2	0,27	
Semana 3	0,27	
Semana 4	0,28	
Semana 5	0,2	
Semana 6	0,27	

Nota. Elaboración propia

En la parcela experimental, durante las seis semanas de evaluación, la humedad del suelo se mantuvo en un rango de 0,20 % a 0,28 %, valores que, según la teoría que sustenta esta investigación, son considerados normales y reflejan una adecuada disponibilidad de agua para el desarrollo del cultivo de palma.

Tabla 13.

Resultados de la capacidad de campo en la parcela experimental

ANÁLISIS DEL SUELO –Capacidad de campo		
Muestras	Capacidad de campo (C.C %)	LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES, Tabla 1: MANEJO DE AGUA DE RIEGO
Semana 1	34	<u>24 a 36</u>
Semana 2	34	
Semana 3	34	
Semana 4	35	
Semana 5	25	
Semana 6	35	

Nota. Elaboración propia

En la Tabla 13, donde se presentan los resultados de la capacidad de campo de la parcela experimental, se observa que los valores se mantienen en un rango de 25 % a 35 % a lo largo de las seis semanas de estudio. Al contrastar estos resultados con la teoría del Centro de Desarrollo Agro (CDA), se determina que dichos valores se encuentran dentro del rango considerado normal, indicando una adecuada retención de humedad en el suelo para el desarrollo del cultivo.

Tabla 14.

Resultados del punto de marchitez de la parcela experimental

ANÁLISIS DEL SUELO – Punto de marchitez		LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES, Tabla 1: MANEJO DE AGUA DE RIEGO
Muestras	Punto de marchitez (P.M %)	
Semana 1	19	<u>11 a 20</u>
Semana 2	20	
Semana 3	20	
Semana 4	19	
Semana 5	14	
Semana 6	20	

Nota. Elaboración propia

En la Tabla 14, donde se presentan los resultados del punto de marchitez de la parcela experimental, se observa que los valores se mantienen en un rango de 14 % a 20 % a lo largo de las seis semanas de estudio. Al contrastar estos resultados con la teoría del Centro de Desarrollo Agro (CDA), se confirma que dichos valores se encuentran dentro del rango considerado normal, lo que indica un adecuado equilibrio hídrico del suelo y condiciones favorables para el crecimiento del cultivo.

3.1.7. Análisis de densidad real, densidad aparente y porosidad de la parcela testigo y experimental (octubre y noviembre)

Tabla 15.

Densidad real y densidad aparente.

PARCELA TESTIGO				
	DENSIDAD REAL (gr/cm ³)	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE (D.A)	DENSIDAD APARENTE (gr/cm ³)	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE (D.R)
1era Semana	2,60		1,53	
2da Semana	2,60		1,30	
3era Semana	2,60	<u>2.45 – 2.65</u>	1,37	<u>1.24 – 1.54</u>
4ta Semana	2,60		1,54	
5ta Semana	2,60		1,54	
6ta Semana	2,60		1,54	

Nota. Elaboración propia

En los análisis de suelo efectuados en la parcela testigo durante las seis semanas de estudio, se determinó que la densidad aparente presentó un promedio de 1,54 g/cm³, mientras que la densidad real alcanzó aproximadamente 2,60 g/cm³. Estos valores indican una textura de suelo franco limoso, característica de suelos con buena aireación y capacidad de retención de agua, lo que favorece el desarrollo radicular y la disponibilidad de nutrientes. De acuerdo con Blake y Hartge (1986), los rangos de densidad aparente en este tipo de suelos suelen encontrarse entre 1,3 y 1,6 g/cm³, coincidiendo con los resultados obtenidos en el presente estudio.

Tabla 16.

Porosidad

PARCELA TESTIGO		
	POROSIDAD (%)	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE DE LA POROSIDAD
1era Semana	41	
2da Semana	50	
3era Semana	47	40 - 50
4ta Semana	40	
5ta Semana	41	
6ta Semana	43	

Nota. Elaboración propia

La porosidad del suelo en la parcela testigo presentó un promedio de 50 %, valor que, según la literatura especializada, se considera ligeramente bajo para suelos de textura franco limosa, donde la porosidad óptima suele oscilar entre 55 % y 60 %. Esta característica influye directamente en la aireación y en la capacidad del suelo para retener agua. De acuerdo con Danielson y Sutherland (1986), la porosidad está estrechamente relacionada con la densidad aparente y la estructura del suelo, siendo un indicador clave de su calidad física y de su capacidad para sustentar el crecimiento de las plantas.

3.1.7.2. Resultados de la parcela experimental, toma de muestras de densidad real, densidad aparente y porosidad

Tabla 17.

Densidad real y aparente

PARCELA EXPERIMENTAL				
	DENSIDAD REAL (gr/cm ³)	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE (D.A)	DENSIDAD APARENTE (gr/cm ³)	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE (D.R)
1era Semana	2,60		1,54	
2da Semana	2,60		1,54	
3era Semana	2,60	2.45 – 2.65	1,53	1.24 – 1.54
4ta Semana	2,60		1,51	
5ta Semana	2,60		1,52	
6ta Semana	2,60		1,50	

Nota. Elaboración propia

Los análisis de densidad realizados en la parcela experimental durante un período de seis semanas determinaron que la densidad aparente presentó un valor promedio de 1,54 g/cm³, mientras que la densidad real alcanzó 2,60 g/cm³. Con base en estos resultados y según los criterios establecidos en el Libro de Densidad Aparente y Real del Suelo, se concluye que el área de estudio corresponde a un suelo de textura franco limosa, caracterizado por una adecuada retención de agua y buena aireación, condiciones favorables para el desarrollo del cultivo.

Tabla 18.

Porosidad

PARCELA EXPERIMENTAL		
	POROSIDAD (%)	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE DE LA POROSIDAD
1era Semana	40	
2da Semana	40	
3era Semana	41	40 - 50
4ta Semana	42	
5ta Semana	41	
6ta Semana	42	

Nota. Elaboración propia

La porosidad del suelo en la parcela experimental presentó un promedio de 42 %, valor que, de acuerdo con los criterios expuestos por Ramírez (2015) en su Libro de Porosidad del Suelo, se considera ligeramente bajo para suelos de textura franco limosa. Este nivel de porosidad puede limitar parcialmente la aireación y la infiltración del agua, factores que influyen en la dinámica hídrica y en el desarrollo radicular de los cultivos.

3.1.8. Resultados de los macro y micronutrientes del suelo

Se tomaron muestras del suelo de las parcelas testigo y experimental para ser llevadas al laboratorio en Quevedo INIAP, en donde se le realizó un estudio completo de macro y micro elementos presentando los respectivos resultados a continuación.

Tabla 19.

Resultados del macro y micro nutrientes en la parcela testigo

ANÁLISIS DE LABORATORIO INIAP- PARCELA TESTIGO		
PARÁMETROS	RESULTADOS LABORATORIO DEL INIAP DE QUEVEDO	LÍMITES PERMISIBLES ANEXO 5
MATERIA ORGANICA (M.O.)	5,4	2 a 5
pH	6,6	6,6 a 7,5
NITROGENO (N)	17	30 a 60
FOSFORO (P)	16	10 a 20
POTASIO (K)	2,52	0,2 a 0,4
CALCIO (Ca)	8	3,0 a 7,0
MAGNESIO (Mg)	2,8	1,0 a 2,5
AZUFRE (S)	24	10 a 20
ZINC (Zn)	5,0	2 a 6
COBRE (Cu)	11,0	2 a 4
HIERRO (Fe)	210	25 a 50
MANGANESO (Mn)	20,0	5 a 10
BORO (B)	0,50	1,4 a 0,9

Nota. Elaboración propia

En la Tabla 19 se presentan los resultados del análisis de suelo correspondiente a la parcela testigo. Los datos obtenidos evidencian que la materia orgánica registra un valor de 5,4 %, considerado ligeramente elevado en comparación con los límites permisibles.

El pH alcanza un valor de 6,6, situándose dentro del rango adecuado para el desarrollo del cultivo. En cuanto a los nutrientes principales, el nitrógeno (N) se encuentra por debajo del nivel óptimo, mientras que el fósforo (P) presenta un valor de 16, considerado normal y dentro de los límites permisibles. Por su parte, los elementos potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), azufre (S), cobre (Cu), hierro (Fe) y manganeso (Mn) muestran valores superiores a los rangos recomendados, lo que podría indicar una ligera acumulación de nutrientes en el suelo. Finalmente, el zinc (Zn) se mantiene dentro de los límites aceptables, mientras que el boro (B) presenta valores inferiores a los permitidos, lo que sugiere una deficiencia leve de este micronutriente en la parcela.

Tabla 20.

Resultados del macro y micro nutrientes de la parcela experimental

ANÁLISIS DE LABORATORIO INIAP- PARCELA EXPERIMENTAL		
PARÁMETROS	RESULTADOS LABORATORIO DEL INIAP DE QUEVEDO	LÍMITES PERMISIBLES ANEXO 5
MATERIA ORGANICA (M.O.)	4,8	2 a 5
pH	8,2	6,6 a 7,3
NITROGENO (N)	17	30 a 60
FOSFORO (P)	20	10 a 20
POTASIO (K)	5,80	0,2 a 0,4
CALCIO (Ca)	7	3,0 a 7,0
MAGNESIO (Mg)	3,6	1,0 a 2,5
AZUFRE (S)	31	10 a 20
ZINC (Zn)	6,8	2 a 6
COBRE (Cu)	14,6	2 a 4
HIERRO (Fe)	215	25 a 50
MANGANESO (Mn)	7,8	5 a 10
BORO (B)	0,42	1,4 a 0,9

Nota. Elaboración propia


En la Tabla 20 se presentan los resultados del análisis de suelo correspondiente a la parcela experimental. Los valores obtenidos indican que la materia orgánica alcanza un 4,8 %, considerado dentro de los límites permisibles según los parámetros de referencia. El pH presenta un valor de 8,2, clasificando al suelo como alcalino dentro de la escala de pH. En relación con los macronutrientes, el nitrógeno (N) se encuentra por debajo del nivel óptimo, mientras que el fósforo (P) muestra un valor de 20, considerado normal y dentro del rango permisible. Por otro lado, los elementos potasio (K), magnesio (Mg), azufre (S), zinc (Zn), cobre (Cu), hierro (Fe) y manganeso (Mn) presentan valores superiores a los límites recomendados, lo que podría reflejar una acumulación de nutrientes en el perfil del suelo. En contraste, el calcio (Ca) se mantiene dentro de los rangos aceptables, mientras que el boro (B) muestra valores por debajo de los límites permisibles, lo que sugiere una deficiencia leve de este micronutriente en la parcela experimental

3.1.9. Características de producción de los racimos (frutos)

3.1.9.1. Resultado de la parcela testigo

Tabla 21.

Resultados de la producción de los racimos de la parcela testigo (Octubre)


EXTRACTORA AGRICOLA RIO MANSO S.A. – PLANTA MONTERREY		
		
PARCELA TESTIGO		
FECHA: 18-Octubre-2018		
RACIMO FRESCO (Kg)	15.82	
	FRUTO EXTERNO	FRUTO INTERNO
ACEITE (gr)	7.876	7.754
POTENCIAL DE ACEITE (%)	23.24	21.13

Nota. Elaboración propia

En la Tabla 21 se presentan los resultados obtenidos en la parcela testigo durante el mes de octubre, correspondientes al análisis de extracción y potencial de aceite en los frutos internos y externos de la palma africana. Los datos muestran que la extracción de aceite en los frutos externos fue de 7,878 g, mientras que en los frutos internos alcanzó 7,754 g, valores obtenidos mediante el proceso de extracción experimental del fruto. En cuanto al potencial de aceite, la parcela testigo registró un 23,24 % en los frutos externos y un 21,13 % en los frutos internos, lo que indica una condición favorable del contenido lipídico. Estos resultados se consideran positivos según los parámetros establecidos por la Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite (FEDEPALMA), los cuales confirman que los valores obtenidos se encuentran dentro del rango esperado para frutos de palma africana (*Elaeis guineensis*) en condiciones adecuadas de manejo y madurez.

Tabla 22.

Resultados de la producción de los racimos de la parcela testigo (Noviembre)

EXTRACTORA AGRICOLA RIO MANSO S.A. – PLANTA MONTERREY		
		
PARCELA TESTIGO		
FECHA: 22-Noviembre-2018		
RACIMO FRESCO (Kg)	14.10	
	FRUTO EXTERNO	FRUTO INTERNO
ACEITE (gr)	5.111	4.711
POTENCIAL DE ACEITE (%)	18.16	15.92


Nota. Elaboración propia

En la Tabla 22 se presentan los resultados obtenidos en la parcela testigo durante el mes de noviembre, correspondientes al análisis de extracción y potencial de aceite de los frutos internos y externos de la palma africana. Los datos muestran que la extracción de aceite en los frutos externos fue de 5,111 g, mientras que en los frutos internos alcanzó 4,711 g, valores determinados mediante el proceso de extracción experimental. En cuanto al potencial de aceite, la parcela testigo registró un 18,16 % en los frutos externos y un 15,92 % en los frutos internos, evidenciando una disminución respecto al mes anterior, aunque manteniéndose en un estado positivo, conforme a los criterios establecidos por la Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite (FEDEPALMA). Estos resultados indican que los frutos analizados conservan un

contenido de aceite adecuado y dentro de los parámetros esperados para la especie *Elaeis guineensis*, según la teoría y la experiencia técnica documentada por FEDEPALMA.

Tabla 23.

Resultados de la producción de los racimos de la parcela Experimental (Octubre)


EXTRACTORA AGRICOLA RIO MANSO S.A. – PLANTA MONTERREY		
		
PARCELA EXPERIMENTAL		
FECHA: 18-Octubre-2018		
RACIMO FRESCO (Kg)	26.06	
	FRUTO EXTERNO	FRUTO INTERNO
ACEITE (gr)	6.451	6.175
POTENCIAL DE ACEITE (%)	18.37	15.51

Nota. Elaboración propia

En la Tabla 23 se presentan los resultados obtenidos en la parcela experimental durante el mes de octubre, correspondientes al análisis de extracción y potencial de aceite de los frutos internos y externos de la palma africana. Los datos indican que la extracción de aceite en los frutos externos fue de 6,451 g, mientras que en los frutos internos alcanzó 6,175 g, valores determinados mediante el proceso de extracción experimental. En cuanto al potencial de aceite, la parcela experimental registró un 18,37 % en los frutos externos y un 15,51 % en los frutos internos, lo que evidencia un rendimiento positivo en la producción de aceite. Estos resultados se encuentran dentro de los parámetros aceptables establecidos por la Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite (FEDEPALMA), cuya teoría y experiencia en el procesamiento de *Elaeis guineensis* respaldan que los valores obtenidos corresponden a frutos con buen contenido de aceite y condiciones adecuadas de madurez y manejo agronómico.

Tabla 24.

Resultados de la producción de los racimos de la parcela experimental (Noviembre)

EXTRACTORA AGRÍCOLA RÍO MANSO S.A. – PLANTA MONTERREY		
		
PARCELA EXPERIMENTAL		
FECHA: 22-Noviembre-2018		
RACIMO FRESCO (Kg)	11.94	
	FRUTO EXTERNO	FRUTO INTERNO
ACEITE (gr)	5.695	5.267
POTENCIAL DE ACEITE (%)	21.82	19.36

Nota. Elaboración propia


En la Tabla 24 se presentan los resultados obtenidos en la parcela experimental durante el mes de noviembre, correspondientes al análisis de extracción y potencial de aceite de los frutos internos y externos de la palma africana. Los datos evidencian que la extracción de aceite en los frutos externos fue de 5,695 g, mientras que en los frutos internos alcanzó 5,267 g, valores determinados mediante el proceso de extracción del fruto. En cuanto al potencial de aceite, la parcela experimental registró un 21,82 % en los frutos externos y un 19,36 % en los frutos internos, lo que representa un estado

positivo en el contenido de aceite. Estos resultados se encuentran en concordancia con los parámetros establecidos por la Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite (FEDEPALMA), cuya teoría y experiencia en el procesamiento de *Elaeis guineensis* respaldan que dichos valores corresponden a frutos con un adecuado nivel de madurez y óptimo rendimiento en la extracción de aceite.

3.1.11. Resultados del requerimiento hídrico de la palma africana

Tabla 25.

Requerimiento hídrico de la Parcela Experimental.



CAUDAL PARCELA EXPERIMENTAL						
Hora	Q1	Q2	Q3	QDíatotal	Qsemanal	Fecha
8:00/16:00pm	19,45 m ³ /h	19,21 m ³ /h	18,94 m ³ /h	57,60 m ³ /h	327,58 m ³ /h	25/10/2018
8:00/16:00pm	19,27 m ³ /h	19,10 m ³ /h	18,28 m ³ /h	56,65 m ³ /h	327,36 m ³ /h	26/10/2018
8:00/16:00pm	19,10 m ³ /h	18,28 m ³ /h	18,15 m ³ /h	55,53 m ³ /h	327,18 m ³ /h	30/10/2018
8:00/16:00pm	18,44 m ³ /h	17,60 m ³ /h	18,26 m ³ /h	54,30 m ³ /h	326,98 m ³ /h	07/11/2018
8:00/16:00pm	17,95 m ³ /h	18,04 m ³ /h	18,00 m ³ /h	53,99 m ³ /h	326,87 m ³ /h	15/11/2018
8:00/16:00pm	18,40 m ³ /h	18,02 m ³ /h	18,00 m ³ /h	54,42 m ³ /h	327,18 m ³ /h	22/11/2018
8:00/16:00pm	18,55 m ³ /h	18,25 m ³ /h	18,00 m ³ /h	54,80 m ³ /h	326,75 m ³ /h	29/11/2018

Nota. Elaboración propia

En la Tabla 25 se presentan los resultados del diagnóstico hídrico realizado en la parcela experimental, en relación con el requerimiento de agua del cultivo de palma africana. Según López (1991), la palma aceitera (*Elaeis guineensis*) demanda cantidades considerables de agua para su óptimo desarrollo, las cuales difícilmente pueden ser satisfechas únicamente por las precipitaciones en las zonas de cultivo. En concordancia con lo señalado por este autor, en la parcela experimental se suplió el requerimiento hídrico mediante un sistema de riego artificial, utilizando el reaprovechamiento del agua proveniente del proceso de extracción de palma, almacenada en la laguna de oxidación número ocho de la empresa donde se llevó a cabo el estudio.

4. Discusión

El uso de aguas residuales tratadas provenientes de lagunas de oxidación como alternativa para el riego agrícola, especialmente en cultivos de palma africana (*Elaeis guineensis*), se consolida como una práctica ambientalmente sostenible y alineada con los principios de producción más limpia. Diversos autores coinciden en que esta técnica contribuye significativamente a la conservación del recurso hídrico y a la reducción de la carga contaminante vertida al ambiente. Según Ibrahim et al. (2024), el riego con aguas residuales tratadas puede mejorar la calidad del suelo y aumentar la materia orgánica disponible, siempre que se mantenga un monitoreo riguroso para evitar la acumulación de sales o metales pesados. Este enfoque permite además optimizar los costos operativos de las unidades productivas, como se evidenció en la Extractora Agrícola Río Manso S.A., Planta Monterrey, donde se reutilizó el agua proveniente de los procesos de extracción de palma.

En la presente investigación, se verificó que la calidad del agua residual tratada particularmente la de la laguna de oxidación número ocho, resultó adecuada para su reutilización en riego agrícola, al no presentar presencia de aceites ni lodos, a diferencia de la laguna siete. Las condiciones fisicoquímicas del agua, con un pH alcalino (8,20–8,60) y una temperatura constante de 27 °C, son compatibles con lo descrito por Hosetti (1995), quien señala que las lagunas de oxidación constituyen un sistema eficaz y sostenible para el tratamiento de efluentes, reduciendo significativamente los contaminantes antes de su aplicación agrícola. Además, investigaciones como la de Butler (2017) destacan que estos sistemas biológicos, basados en la acción de microorganismos y algas, presentan ventajas económicas y bajo requerimiento energético, lo que los hace idóneos para entornos rurales y agroindustriales.

Los análisis de suelo realizados antes y durante el riego mostraron que el uso de agua residual tratada provocó un ligero aumento del pH en la parcela experimental, alcanzando valores alcalinos, mientras que la parcela testigo se mantuvo dentro de un rango neutro. Sin embargo, no se evidenciaron cambios relevantes en otros parámetros físico-químicos como la conductividad eléctrica, la humedad, la capacidad de campo o el punto de marchitez, los cuales permanecieron dentro de los rangos óptimos para la palma africana. Estos resultados coinciden con los reportados por Reuse of Lagoon Effluents (s.f.), donde se señala que los efluentes de lagunas, tras un tratamiento adecuado, pueden ser reutilizados en la agricultura sin generar impactos negativos significativos en las propiedades del suelo.

En relación con los nutrientes del suelo, las diferencias más notorias se observaron en los niveles de zinc y calcio. En la parcela experimental, el zinc superó los límites permisibles, lo que sugiere un posible riesgo de toxicidad si no se establecen controles de seguimiento. En contraste, los niveles de calcio, aunque más altos en la parcela testigo, se mantuvieron dentro de márgenes adecuados en la experimental, mostrando un equilibrio en la distribución del nutriente. Este comportamiento es coherente con lo planteado por Ibrahim et al. (2024), quienes destacan que el uso de aguas residuales tratadas puede alterar de manera leve la disponibilidad de micronutrientes, pero sin comprometer la estructura o funcionalidad del suelo si se aplican medidas de control.

En cuanto a la calidad del fruto y su potencial de aceite, las diferencias entre parcelas fueron mínimas. En la parcela testigo, el contenido de aceite en los frutos externos varió entre 23,24 % y 18,16 %, mientras que en la experimental osciló entre 21,82 % y 18,37 %; en los frutos internos, los valores fluctuaron entre 21,13 % y 15,92 % (testigo) y 19,36 % y 15,51 % (experimental). Estos resultados confirman que el riego con agua residual tratada no afectó negativamente la productividad ni la calidad del aceite de palma, manteniendo los valores dentro de los rangos esperados para la producción comercial, tal como respalda FEDEPALMA (López, 1991).

Finalmente, el reaprovechamiento de aguas residuales tratadas como fuente de riego se confirma como una alternativa técnica, económica y ambientalmente viable, siempre que se implementen planes de manejo y monitoreo continuo. La literatura reciente, como la de Alzahrani et al. (2023), subraya que la sostenibilidad de estas prácticas depende también de factores sociales, económicos y de aceptación pública, lo que refuerza la necesidad de estrategias integrales que combinen control ambiental, capacitación

técnica y participación comunitaria. En conjunto, los resultados de esta investigación demuestran que la reutilización del agua tratada puede ser una herramienta eficaz para promover una agricultura más resiliente, circular y sostenible, especialmente en regiones con alta presión hídrica.

5. Conclusiones

Los resultados obtenidos en esta investigación demuestran que el uso de agua residual tratada proveniente del sistema de tratamiento de la laguna de oxidación número ocho de la Extractora Agrícola Río Manso S.A., Planta Monterrey, constituye una alternativa viable y sostenible para el riego del cultivo de palma africana (*Elaeis guineensis*), sin afectar negativamente las propiedades productivas del cultivo ni comprometer la calidad del fruto y del aceite extraído. El análisis comparativo entre las parcelas testigo y experimental evidenció que, aunque se presentó una variación significativa en el pH del suelo, con valores superiores a 8,20 en la parcela irrigada con agua residual tratada—este cambio hacia condiciones alcalinas no afectó de forma negativa el desarrollo del cultivo. Por el contrario, el pH alcalino puede considerarse favorable en ciertas condiciones agronómicas propias de la palma africana.

En cuanto a los demás parámetros fisicoquímicos del suelo (humedad, conductividad eléctrica, capacidad de campo y punto de marchitez), no se identificaron diferencias relevantes entre ambas parcelas, lo que indica que el uso de agua residual tratada no altera de forma significativa la dinámica hídrica del suelo. Asimismo, los macro y micronutrientes presentes en el suelo no mostraron variaciones importantes, a excepción del zinc, que presentó valores superiores a los permisibles, y del calcio, que se mantuvo dentro de los rangos adecuados. Esto sugiere la necesidad de un monitoreo continuo de ciertos elementos, principalmente el zinc, para prevenir posibles acumulaciones que puedan afectar la salud del suelo o del cultivo a largo plazo.

Finalmente, los resultados en cuanto a la producción de racimos y al potencial de aceite mostraron que no existen diferencias significativas entre las parcelas, lo cual refuerza la viabilidad del uso de agua residual tratada como fuente de riego en el cultivo de palma africana. Esta práctica no solo permite una gestión más eficiente del recurso hídrico, sino que también representa una estrategia de reutilización ambientalmente responsable, que contribuye a la sostenibilidad del sistema productivo de la empresa.

En conjunto, estos hallazgos sugieren que la implementación del riego con agua residual tratada puede incorporarse como parte de un plan integral de manejo de recursos en la industria de la palma, siempre y cuando se establezca un control periódico de la calidad del agua y del suelo para garantizar la sostenibilidad agronómica y ambiental del cultivo a largo plazo.

Referencias Bibliográficas

- Aguilar, D. (4 de diciembre de 2017). *La historia*. Obtenido de <http://lahistoria.ec/2017/10/04/la-palma-africana-se-apodera-silenciosamente-de-ecuador/>
- Agrícola, R. (12 de marzo de 2017). *Red Agrícola*. Obtenido de <http://www.redagricola.com/cl/conductividad-electrica-salinidad/>

- Alzahrani, F., Elsebaei, M., & Tawfik, R. (2023). Public acceptance of treated wastewater reuse in the agricultural sector in Saudi Arabia. *Sustainability*, 15(21), 15434. <https://doi.org/10.3390/su152115434>
- ANCUPA. (27 de octubre de 2015). *Palma: La voz del palmicultor*. Obtenido de <http://ancupa.com/wp-content/uploads/2018/02/PALMA-ANCUPA-Febrero-web.pdf>
- Blake, G. R., & Hartge, K. H. (1986). Bulk density. En A. Klute (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods* (2.^a ed., pp. 363–382). American Society of Agronomy / Soil Science Society of America.
- Bruges, C. (1 de enero de 2000). *CID Palmero*. Obtenido de <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/793>
- Bucaramanga, U. T. (14 de septiembre de 2014). *Suelos: Palma africana*. Scribd. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/239735463/Suelos-Palma-Africana>
- Butler, E. (2017). Oxidation pond for municipal wastewater treatment. *Applied Water Science*, 7, 107–116. <https://doi.org/10.1007/s13201-015-0285-z>
- CENIPALMA. (11 de marzo de 1996). *Manejo de efluentes de plantas extractoras*. Obtenido de <file:///C:/Users/USER/Downloads/10522-Texto%20del%20art%C3%ADculo-10684-1-10-20130127.pdf>
- Danielson, R. E., & Sutherland, P. L. (1986). Porosity. En A. Klute (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods* (2.^a ed., pp. 443–461). American Society of Agronomy / Soil Science Society of America.
- Eddy, M. (14 de mayo de 1972). *Ingeniería de aguas residuales*. Obtenido de <https://translate.google.com.ec/translate?hl=es-419&sl=en&u=https://www.amazon.com/Wastewater-Engineering-Collection-Treatment-Disposal/dp/0070416753&prev=search>
- FAO. (junio de 2017). *Agricultura de conservación*. Obtenido de http://www.fao.org/ag/ca/training_materials/cd27-spanish/sm/soil_moisture.pdf
- FAO. (septiembre de 2012). Obtenido de [http://www.scrip.org/\(S\(351jmbntvnsjt1aadkposzje\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=552874](http://www.scrip.org/(S(351jmbntvnsjt1aadkposzje))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=552874)
- FEDAPAL. (agosto de 2005). *Aceite de palma del Ecuador*. Obtenido de <http://www.fedapal.org/web2017/index.php/bondades-de-la-palma/publicaciones/book/8/1?page=2>
- Hosetti, B. B. (1995). A review of the sustainable value of effluents and sludges. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 32(1), 1–9. [https://doi.org/10.1016/0147-6513\(95\)00005-4](https://doi.org/10.1016/0147-6513(95)00005-4)
- Ibrahim, L. A., Al-Hazmi, A. H., & El-Gendy, A. S. (2024). Assessment of the impact of irrigating with treated wastewater on soil and crop productivity. *Environmental Technology & Innovation*, 35, 103–119. <https://doi.org/10.1080/23570008.2024.2357295>
- IICA. (octubre de 2006). *Cultivo de la palma africana: Guía técnica*. Obtenido de <http://www.galeon.com/subproductospalma/guiapalma.pdf>

- Kali, K. (6 de junio de 2017). *Palma africana*. Obtenido de https://www.kali-gmbh.com/eses/fertiliser/advisory_service/crops/oilpalm.html
- López, J. (1991). *Cultivo y producción de la palma aceitera*. Bogotá: Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite (FEDEPALMA).
- NSW. (12 de mayo de 2017). Obtenido de <https://www.environment.nsw.gov.au/water/waterqual.htm>
- Orozco, A. (9 de febrero de 2014). *Bioingeniería de aguas residuales: Teoría y diseño*. Obtenido de <https://www.librosyeditores.com/tiendalemoine/ingenieria/4764-bioingenieria-de-aguas-residuales-teoria-y-diseno-978958965482.html>
- Ortiz, J. (4 de mayo de 2015). *T-UCE*. Obtenido de <file:///C:/Users/user/Downloads/T-UCE-0012-363.pdf>
- Potter, L. (28 de octubre de 2013). *Eutopía*. Obtenido de <http://revistas.flacsoandes.edu.ec/eutopia/article/view/1028>
- Ramírez, D. (2015). *Porosidad del suelo y su relación con la estructura y retención de agua*. México: Editorial AgroCiencia.
- Regalado, F. (2010). *Manejo de la palma africana*. Colombia: Coapalmaecara.
- Regalado, F. (abril de 2009). *Manejo de palma africana*. Obtenido de <http://www.coapalmaecara.com/files/03%20Manejo%20de%20la%20palma%20africana.pdf>
- Reuse of lagoon effluents in agriculture by post-treatment in a step feed dual treatment process. (s.f.). *Water Research*, 36(4), 943–952. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(01\)00285-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00285-9)
- Rodríguez Zambrano, P. D. (2011). *Evaluación de la palma africana*. Repositorio ESPOCH. Obtenido de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/1653/1/236T0055.pdf>
- Rothschuh, J. (7 de enero de 1983). *La palma africana*. Managua: MIDINRA.
- Sabaté, J. (28 de noviembre de 2016). *El Diario.es*. Obtenido de https://www.eldiario.es/consumoclaro/por_derecho/aceite-palma-perjudicial-enfermedades-coronarias-medio-ambiente_0_580942112.html
- Sula, S. P. (6 de abril de 2009). *Manual Palma*. Obtenido de <https://palma.webcindario.com/manualpalma.pdf>
- Torres, N. S. (3 de junio de 2017). *Universidad de La Salle*. Obtenido de http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/21527/41102133_2017.pdf?sequence=1

CONFLICTO DE INTERESES

“Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses”.