

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE BIOSISTEMAS

**ESTUDIO COMPARATIVO DE INDICADORES FÍSICOS, QUÍMICOS Y
MICROBIOLÓGICOS DE CALIDAD DE SUELO EN PLANTACIONES DE PALMA
ACEITERA CON USO DE ENMIENDAS ORGÁNICAS Y MANEJO CONVENCIONAL
EN QUEPOS, COSTA RICA**

TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN PARA OPTAR POR EL GRADO DE
LICENCIATURA EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y DE BIOSISTEMAS

TOMÁS ANDRÉS RODRÍGUEZ CORDERO

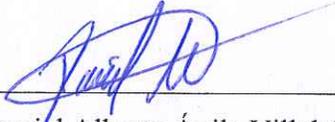
DANIEL ALBERTO ÁVILA VILLALOBOS

CIUDAD UNIVERSITARIA RODRIGO FACIO
SAN JOSÉ, COSTA RICA

2023

HOJA DE APROBACIÓN

Este Trabajo Final de Graduación fue aceptado por la Comisión de Trabajos Finales de Graduación de la Escuela de Ingeniería de Biosistemas de la Universidad de Costa Rica, como requisito para optar al grado y título de Licenciatura de Ingeniería Agrícola y de Biosistemas.



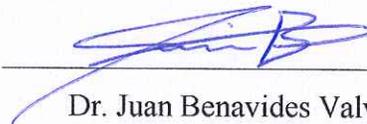
Ing. Daniel Alberto Ávila Villalobos
Sustentante



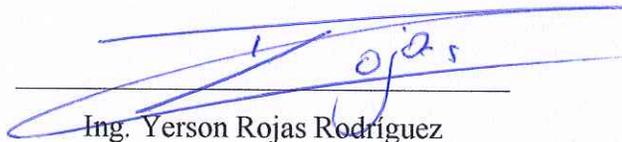
Ing. Tomás Andrés Rodríguez Cordero
Sustentante



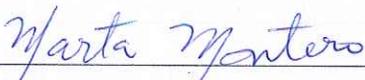
Dra. Mariana de Alfaro Santamaría
Directora, Comité Asesor



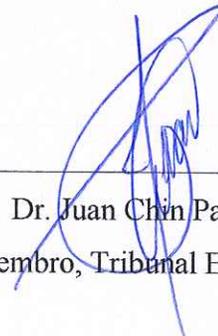
Dr. Juan Benavides Valverde
Miembro, Comité Asesor



Ing. Yerson Rojas Rodríguez
Miembro, Comité Asesor



Dra. Marta Montero Calderón
Presidente, Tribunal Examinador



Dr. Juan Chin Pampillo
Miembro, Tribunal Examinador

DEDICATORIA

Daniel Alberto Ávila Villalobos

*A mi padre Mario, a mi madre Isabel, a mi hermana Diana, a mi tía Roxana y a mi familia,
por su amor, guía y apoyo incondicional.*

Tomás Andrés Rodríguez Cordero

*A mi abuela Emilce, hasta el cielo, que sería la primera en celebrar este momento.
A mi mamá Mari, mis hermanos Carlos y Gustavo y a mi abuelo Carlos.*

AGRADECIMIENTOS

A los profesores asesores Marianela Alfaro Santamaría y Juan Benavides Valverde por su guía, acompañamiento, disposición y motivación para el desarrollo del proyecto.

A la empresa Palma Tica S.A. por abrirnos las puertas y permitir el desarrollo de esta investigación.

Al Ing. Jonathan Masís Azofeifa, Ing. Yerson Rojas Rodríguez, a don Juan Camacho, Oscar Segura, William Piedra y a todos los colaboradores y colaboradoras de Palma Tica S.A. por el apoyo y colaboración.

Al profesor Geovanni Carmona Villalobos por la ayuda y motivación para siempre dar lo mejor de nosotros en este proyecto y en la vida.

INDICE GENERAL

RESUMEN.....	1
1. INTRODUCCIÓN	3
1.1. <i>Delimitación del problema</i>	5
2. OBJETIVOS	6
2.1. <i>Objetivo general</i>	6
2.2. <i>Objetivos específicos</i>	6
3. MARCO TEÓRICO	7
3.1. <i>Generalidades de la palma aceitera (Elaeis guineensis)</i>	7
3.2. <i>Producción de palma aceitera en Costa Rica</i>	8
3.3. <i>Aprovechamiento de residuos del procesamiento de aceite</i>	9
3.4. <i>Calidad del suelo</i>	12
3.4.1. <i>Calidad física</i>	13
3.4.2. <i>Calidad química</i>	15
3.4.3. <i>Calidad biológica</i>	18
3.5. <i>Estudios comparativos de la adición de enmiendas orgánicas y fertilización convencional en los sistemas productivos</i>	19
3.6. <i>Descripción de la empresa</i>	20
4. METODOLOGÍA.....	21
4.1. <i>Sitio de estudio</i>	21
4.2. <i>Tratamientos evaluados</i>	22
4.3. <i>Parcelas experimentales y muestreo</i>	23
4.4. <i>Indicadores físicos evaluados</i>	25
4.4.1. <i>Densidad aparente y porosidad</i>	25
4.4.2. <i>Conductividad hidráulica</i>	25
4.4.3. <i>Infiltración</i>	27

4.4.4.	<i>Resistencia a la penetración</i>	28
4.4.5.	<i>Materia orgánica</i>	28
4.5.	<i>Indicadores microbiológicos evaluados</i>	29
4.5.1.	<i>Actividad microbiana</i>	29
4.5.2.	<i>Biomasa microbiana</i>	29
4.5.3.	<i>Recuento de fijadores de nitrógeno</i>	29
4.5.4.	<i>Recuento de hongos</i>	29
4.6.	<i>Indicadores químicos evaluados</i>	29
4.6.1.	<i>Macronutrientes y micronutrientes</i>	30
4.6.2.	<i>Carbono</i>	30
4.7.	<i>Productividad de los lotes en estudio</i>	30
4.8.	<i>Índice de calidad de suelo aditivo (ICSA)</i>	31
4.9.	<i>Posibles acciones de mejora</i>	31
4.10.	<i>Análisis estadístico</i>	31
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	33
5.1.	<i>Análisis comparativo entre tratamientos: aplicación de enmiendas orgánicas y manejo convencional</i>	33
5.1.1.	<i>Indicadores físicos</i>	33
5.1.2.	<i>Indicadores químicos</i>	34
5.1.3.	<i>Indicadores microbiológicos</i>	37
5.2.	<i>Análisis de los parámetros que mostraron diferencias significativas entre las repeticiones de un mismo tratamiento.</i>	38
5.2.1.	<i>Indicadores físicos</i>	39
5.2.2.	<i>Indicadores químicos</i>	43
5.2.3.	<i>Indicadores microbiológicos</i>	45
5.3.	<i>Análisis de productividad entre tratamientos</i>	46
5.4.	<i>Índice de calidad de suelo aditivo (ICSA)</i>	47
6.	RECOMENDACIONES PARA OPTIMIZAR EL MANEJO DE SUELOS Y PRODUCTIVIDAD	49

7. CONCLUSIONES	50
8. RECOMENDACIONES GENERALES	51
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52
10. ANEXOS	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución de parcelas de investigación, Finca Nicoya, División Quepos, Palma Tica S.A. (Proyección CRTM05).....	21
Figura 2. a) Distribución y distancia entre palmas. b) Distribución de parcelas.	22
Figura 3. Estacas para demarcación de parcelas.....	24
Figura 4. Esquema del permeámetro de carga constante.....	26
Figura 5. Esquema del método de Porchet para la determinación de infiltración en campo.	27

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Adición de enmiendas orgánicas en el lote 25 en los últimos 5 años.	23
Tabla 2. Criterios de selección de lotes.....	24
Tabla 3. Valores p obtenidos en los indicadores físicos de calidad de la prueba estadística no paramétrica Kruskal-Wallis para las parcelas experimentales de cada lote de estudio.	33
Tabla 4. Conductividad hidráulica promedio obtenida para la comparación entre los tratamientos agronómicos evaluados de adición de enmiendas orgánicas y fertilización convencional.....	34
Tabla 5. Valores p obtenidos en los indicadores químicos de calidad de la prueba estadística no paramétrica Kruskal-Wallis para las parcelas experimentales de cada lote de estudio.	35
Tabla 6. Indicadores químicos promedio obtenidos para la comparación entre los tratamientos agronómicos evaluados de adición de enmiendas orgánicas y fertilización convencional.....	35
Tabla 7. Valores p obtenidos en los indicadores microbiológicos de calidad de la prueba estadística no paramétrica Kruskal-Wallis para las parcelas experimentales de cada lote de estudio.	37
Tabla 8. Indicadores microbiológicos promedio obtenidos para la comparación entre los tratamientos agronómicos evaluados de adición de enmiendas orgánicas y fertilización convencional.	38

Tabla 9. Valores promedio de indicadores físicos evaluados para cada tratamiento con adición de enmiendas orgánicas y fertilización convencional.....	40
Tabla 10. Valores promedio de indicadores químicos evaluados para los tratamientos con adición de enmiendas orgánicas y fertilización convencional.....	43
Tabla 11. Valores promedio de indicadores microbiológicos evaluados para los tratamientos con adición de enmiendas orgánicas y fertilización convencional.....	45
Tabla 12. Valores promedio de diferentes parámetros de productividad analizados mediante la prueba t de student para los manejos agronómicos estudiados del periodo 2014-2021.	46
Tabla 13. Índice de calidad del suelo aditivo (ICSA) para los indicadores estudiados.	48

RESUMEN

La palma aceitera (*Elaeis guineensis*) corresponde al principal cultivo oleaginoso a nivel mundial debido a su alta productividad y ciclo de vida. Para suplir la demanda nutricional del cultivo de palma de aceite se utilizan fertilizantes convencionales, los cuales se traducen en altos costos económicos y dependencia del mercado internacional de fertilizantes sintéticos.

En el proceso de extracción de aceite de palma, se generan gran cantidad de residuos orgánicos como fibras, cenizas y lodos provenientes de las lagunas de oxidación. Estos residuos bajo el marco de economía circular, se pueden revalorizar y aplicar en campo como enmiendas orgánicas para el mejoramiento de la calidad de los suelos.

Se ha observado en la literatura que el uso de enmiendas orgánicas trae consigo una serie de beneficios para los cultivos y mejora la calidad de los suelos agrícolas, al mismo tiempo que promueve los postulados de la agricultura climáticamente inteligente y la adaptación y resiliencia ante el cambio climático. Esta investigación tiene como objetivo determinar si la aplicación de enmiendas orgánicas en el suelo de plantaciones de palma aceitera presenta algún efecto considerable en la producción y manejo del cultivo.

En el presente estudio se realizó una comparación de indicadores físicos, químicos y microbiológicos de calidad del suelo, así como la productividad en plantaciones de palma aceitera de la empresa Palma Tica S.A. bajo los tratamientos de adición de enmiendas orgánicas y fertilización convencional. Además, se determinó el Índice de Calidad del Suelo Aditivo (ICSA) para ambos tratamientos. Se realizaron muestreos de suelo a una profundidad de 0-20 cm. Los indicadores de calidad físicos analizados fueron: densidad aparente y porosidad, conductividad hidráulica, infiltración, resistencia a la penetración y materia orgánica. Los indicadores de calidad químicos analizados fueron: Ca, Mg, K, P, N, Zn, Cu, Fe, Mn, pH y C orgánico. Por otra parte, los indicadores de calidad microbiológicos analizados fueron: la respiración microbiana (actividad), biomasa microbiana, recuento de fijadores de nitrógeno y recuento de hongos.

Se observó mediante el análisis estadístico que existen diferencias significativas en el indicador físico de conductividad hidráulica, los indicadores químicos K, N, Fe y P, y en el indicador microbiológico de biomasa microbiana en el tratamiento de adición de enmiendas orgánicas frente

a la fertilización convencional. Los resultados indican que la adición de enmiendas orgánicas en los lotes analizados ha tenido un efecto positivo sobre la calidad del suelo.

Con respecto a la productividad, se analizaron los indicadores de productividad (ton/ha), peso promedio del racimo (kg) y densidad de racimos por hectárea y se observó a nivel estadístico que no se presentan diferencias significativas entre los tratamientos.

Por último, no se observaron diferencias estadísticamente significativas en la calidad del suelo mediante el ICOSA entre los tratamientos analizados.

A pesar de que se observaron diferencias significativas en los indicadores mencionados anteriormente, no es posible asegurar que estas diferencias y mejoras en las condiciones del suelo, se deban únicamente a la aplicación de enmiendas orgánicas, debido a que los factores como formación del suelo, factores climáticos y prácticas de manejo agrícolas inciden sobre la calidad del suelo.

Con respecto a los indicadores de calidad que no presentaron diferencias significativas entre tratamientos, es un resultado positivo, ya que las condiciones del suelo se mantuvieron sin diferencias con la aplicación de enmiendas orgánicas. La aplicación de enmiendas orgánicas permite disminuir la dependencia de fertilizantes comerciales y revalorizar residuos generados en el proceso de extracción de aceite, al mismo tiempo que impacta positivamente el aspecto económico de la empresa.

1. INTRODUCCIÓN

El cultivo de palma aceitera (*Elaeis guineensis*) ha presentado en las últimas décadas un crecimiento acelerado, donde en el año 2000 se contabilizó a nivel mundial una producción de 22 220 000 toneladas métricas de aceite de palma, mientras que en el año 2021 se triplicó, alcanzando una cifra de 72 863 000 toneladas métricas (Ritchie y Roser, 2021; USDA, 2021). Los mayores productores a nivel mundial corresponden a Indonesia y Malasia, los cuales constituyen un 60% y 24% de la producción de mercado global, respectivamente. Continúan la lista de productores, Tailandia (4%), Colombia (2%), Nigeria (2%), Guatemala (1%), Brasil (1%), entre otros (USDA, 2021).

La palma de aceite es catalogada como el principal cultivo oleaginoso a nivel mundial y se caracteriza por presentar una alta productividad y un ciclo de vida extenso, mayor a los 25 años (Woittiez et al., 2018). Según las bases de datos de la FAO, dentro de la extensión territorial global destinada para los cultivos oleaginosos, la palma aceitera utiliza el 8,6% de los suelos y aporta el 36% de la producción total de aceite vegetal (Ritchie y Roser, 2021). Este dato se torna más atractivo al compararlo con otros cultivos oleaginosos a nivel global como el caso de la soya, el cual es responsable del 25,5% de la producción de aceite vegetal, pero ocupa el 39% de las tierras (Ritchie y Roser, 2021). Lo anterior hace referencia a los rendimientos observados para cada tipo de cultivo, en el caso de la palma aceitera, en el año 2014 se obtuvo en la región latinoamericana un rendimiento promedio de 3,6 toneladas de aceite por hectárea por año, siendo nueve veces mayor que el rendimiento observado para la soya (González-Cárdenas, 2016).

En Costa Rica, el cultivo de palma aceitera (*Elaeis guineensis*) inició en la década de 1940 al sustituir las plantaciones de banano en la zona Quepos y Parrita y posteriormente se desplazó a la zona sur del país. En la actualidad, la producción del cultivo de palma aceitera se establece principalmente en el Pacífico Central y Sur del país (Cámara Nacional de Productores de Palma, n.da.).

Como parte de la producción de aceite de palma, se producen residuos como lodos, fibras y cenizas, los cuales, si no son tratados adecuadamente, pueden acarrear problemas ambientales y de contaminación de gran impacto. Posterior a la extracción de aceite, es posible recuperar los lodos generados en lagunas de oxidación para su estabilización y posterior aplicación como enmiendas orgánicas en los sistemas productivos (Avendaño-Cardenas & Martinez-Gonzalez,

2015). La empresa Palma Tica S.A. dedicada a la producción, manufactura y distribución a nivel mundial de productos derivados del aceite de palma aceitera, ha observado un alto potencial en la reutilización de estos residuos mediante el uso de enmiendas orgánicas para el mejoramiento de la calidad del suelo y para solventar necesidades energéticas en las plantas de extracción de aceite de palma. Esto representa un gran interés a nivel empresarial, debido a la adopción de postulados de la economía circular a través del aprovechamiento de las fases del ciclo de vida del producto y una agricultura climáticamente inteligente, que busca la adaptación y resiliencia ante el cambio climático. El uso de enmiendas orgánicas puede ayudar a la disminución en la dependencia de fertilizantes comerciales y mejorar las propiedades del suelo para favorecer la conservación del agua, ciclaje de nutrientes, entre otros.

Según diversos estudios, la aplicación de enmiendas orgánicas ha provocado un mejoramiento de productividad o rendimiento de los cultivos relacionado al aumento en la fertilidad del suelo (Álvarez-Solís et al., 2010; Rosa et al., 2021; Rotondo et al., 2009; Urra, 2020). En el caso de la empresa Palma Tica, se ha venido utilizando estos residuos desde el año 2016, mas cabe mencionar que no cuentan con información científica o investigaciones sobre la cuantificación del impacto del uso de estos residuos sobre la calidad del suelo y la productividad de las plantaciones.

Este trabajo final de graduación consistió en la evaluación del efecto de la aplicación de enmiendas orgánicas sobre la calidad del suelo en plantaciones de palma aceitera en Quepos, Costa Rica, y su comparación con el manejo convencional. La empresa Palma Tica S.A. emplea enmiendas orgánicas provenientes de la planta de extracción de aceite como fibras y cenizas y la planta de tratamiento de aguas residuales como los son los lodos depurados. Se evaluaron los parámetros físicos, químicos y microbiológicos del suelo después de cinco años de aplicación. Dentro de los parámetros físicos se evaluaron la densidad aparente y porosidad, conductividad hidráulica, infiltración, resistencia a la penetración y materia orgánica (%). Por otra parte, los parámetros químicos analizados fueron el Ca, Mg, K, P, N, Zn, Cu, Fe, Mn, S, pH y carbono orgánico (Mg/ha). Por último, los parámetros microbiológicos evaluados fueron la respiración microbiana, biomasa microbiana, recuento de fijadores de nitrógeno y recuento de hongos.

1.1. Delimitación del problema

En el presente estudio se realizó una comparación de indicadores físicos, químicos y microbiológicos de calidad del suelo en plantaciones de palma aceitera con aplicación de enmiendas orgánicas y manejo convencional. Dichas plantaciones se ubican en la empresa Palma Tica S.A., Distrito Damas, División Quepos, Puntarenas, Costa Rica.

La evaluación de los indicadores se realizó después de cinco años de aplicación de enmiendas orgánicas provenientes de residuos de la planta de extracción de aceite y planta de tratamiento de aguas residuales de la empresa. Los muestreos se realizaron entre los meses de mayo y julio de 2022, a una profundidad de 0-20 cm. Se compararon dos tratamientos, uno con el uso de enmiendas y otro con manejo convencional. Además, se obtuvieron los datos de productividad registrados de las plantaciones por la empresa Palma Tica S.A. desde el año 2014 hasta el 2021 y los años que se han aplicado enmiendas orgánicas, con el fin de determinar si existe un efecto relacionado a la aplicación de enmiendas sobre la productividad. Además, se obtuvo el Índice de Calidad de Suelo Aditivo (ICSA) para determinar cuál tratamiento presenta una mejor calidad del suelo a partir de los indicadores evaluados.

Para esto, se seleccionaron dos lotes de la finca Nicoya, donde los lotes rondan extensiones mayores a 80 ha, diferenciadas en función del manejo del cultivo. Esta selección de lotes a utilizar para los muestreos de cada tratamiento se realizó bajo criterios de ubicación, topografía, tipo de suelos, variedad de palma. Se seleccionó un lote con manejo agronómico convencional con aplicación de fertilizantes y herbicidas, y un segundo lote con aplicación de enmiendas orgánicas.

Dentro de los indicadores físicos evaluados se encuentran los ensayos de densidad aparente y porosidad total, conductividad hidráulica, infiltración, resistencia a la penetración y materia orgánica (%). Por otra parte, los indicadores químicos evaluados corresponden a los macronutrientes Ca, Mg, K, P, S y N, y micronutrientes Zn, Cu, Fe, Mn en suelo, así como el pH y el carbono orgánico (Mg/ha). Con respecto a los indicadores microbiológicos, se evaluaron la actividad microbiana (respiración) (mg C-CO₂/kg día), biomasa microbiana (mg C/kg), recuento de fijadores de nitrógeno (UFC/g) y recuento de hongos en el suelo (UFC/g).

Con este estudio se busca determinar si la aplicación de enmiendas orgánicas en el suelo de plantaciones de palma aceitera presenta algún efecto considerable en la producción y manejo de este cultivo.

2. OBJETIVOS

2.1. *Objetivo general*

Determinar el efecto de las prácticas de manejo, con uso de enmiendas orgánicas y aplicación convencional de fertilizantes, sobre las características físico, químicas y microbiológicas del suelo en plantaciones de palma aceitera (*Elaeis guineensis*) de la empresa Palma Tica.

2.2. *Objetivos específicos*

1. Evaluar y comparar las características físicas y químicas del suelo en plantaciones de producción de palma aceitera con uso de enmiendas orgánicas y manejo convencional.
2. Evaluar y comparar las características microbiológicas del suelo en plantaciones de producción de palma aceitera con uso de enmiendas orgánicas y manejo convencional.
3. Analizar y comparar la productividad de los lotes con manejo con enmiendas orgánicas y manejo convencional en los suelos bajo estudio y relacionarlo con las características físicas, químicas y microbiológicas del suelo a evaluar.
4. Determinar el Índice de Calidad del Suelo Aditivo (ICSA) como índice de calidad global que involucra los parámetros a evaluar, tanto en el sistema con enmiendas orgánicas como el convencional.
5. Proponer recomendaciones para optimizar el manejo de suelos y productividad de las plantaciones de palma bajo estudio de acuerdo con los resultados obtenidos.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Generalidades de la palma aceitera (*Elaeis guineensis*)

La palma de aceite (*Elaeis guineensis*), es una monocotiledónea perteneciente al orden de las Arecales y a la familia Arecaceae, siendo la especie de palma más estudiada y utilizada comercialmente en el mundo. Esta especie es nativa de las áreas húmedas de África tropical, este y centro del continente. De manera salvaje, la distribución de palma se localiza entre las latitudes 10°S y 10°N (Soh et al., 2017). La palma de aceite se desarrolla en regiones tropicales y subtropicales, con un crecimiento continuo a lo largo de las cinco etapas de crecimiento claramente definidas, identificadas como embrión, plántula, establecimiento, fase adulta vegetativa y fase adulta reproductiva (Forero Hernández et al., 2012).

El cultivo de palma aceitera corresponde a un cultivo de tipo perenne que comprende cuatro fases de productividad en campo. Según Woittiez et al. (2018), la primera fase se denomina fase de construcción, en donde la palma se encuentra en su etapa inmadura y no se producen frutos cosechables, esta fase se extiende hasta los 2-3 años a partir de la siembra. La siguiente fase se denomina fase de ascenso del rendimiento, la palma se encuentra en su etapa joven madura y la producción de frutos aumenta de manera exponencial a partir de los 4 a los 7 años desde la siembra. La fase siguiente corresponde a la fase de producción, en donde la palma alcanza la etapa madura y se extiende desde los 8 hasta los 14 años posteriores a la siembra. Por último, se alcanza la fase final productiva, en donde se reduce la producción de frutos y se extiende desde los 15 años hasta los 25 años del ciclo productivo del cultivo. Sin embargo, los avances tecnológicos en la creación de nuevas variedades de palma han permitido continuar la producción después de los 30 años del cultivo.

El crecimiento de la palma aceitera en sus etapas iniciales se da por 20-50 cm por año hasta el quinto año, a partir del cual su crecimiento puede ser hasta de 60-100 cm por año. El periodo de vida de la palma alcanza los 200 años (Ruiz et al., 2013), sin embargo, tradicionalmente la altura máxima de una palma para que sea económicamente viable es de 10-12 m y su etapa productiva es de 25-30 años, aunque pueden presentarse casos en que tanto la altura como la edad exceda estos valores (Soh et al., 2017).

En cuanto a los requerimientos ecológicos y medioambientales ideales para la producción de palma aceitera, se encuentran precipitaciones de 2000-2500 mm, ya que el estrés hídrico provoca la

reducción en la expansión de las hojas y afectaciones en el crecimiento de la planta. La humedad relativa superior a 75%, temperaturas de 24-28°C, radiación solar de 16-17 MJm⁻² por día o más de 5 horas de luz. Además, la palma requiere de suelos arcillosos bien estructurados, con drenaje adecuado y un pH que ronda los 3,5-7,5. Otro aspecto importante es que las plantaciones de palma cercanas a la costa pueden verse afectadas debido a la salinidad del agua (Soh et al., 2017).

3.2. Producción de palma aceitera en Costa Rica

El cultivo de palma aceitera en Costa Rica inicia su producción en la década de 1940 en la zona del Pacífico Central. Esto es debido a las graves afectaciones en la década de 1930 provocadas por la enfermedad de *Sigatoka* en los cultivos de banano administrados por la empresa multinacional estadounidense United Fruit Company (UFCo). Una solución para combatir la enfermedad de *Sigatoka* causada por un hongo capaz de dispersarse por aire, fue la sobreaplicación de sulfato de cobre en los cultivos de banano. Las grandes concentraciones de este químico inhabilitaron el uso de los suelos para gran diversidad de cultivos. Debido a esta condición en los suelos, la UFCo analizó diferentes cultivos alternativos que cumplieran con los aspectos de tolerancia al sulfato de cobre y a la viabilidad económica para ocupar las fincas productoras (Clare-Rhoades, 2011).

En el año de 1942, la dirección de UFCo analizó la posibilidad de sembrar plantaciones de palma en sus terrenos por lo que se inició una etapa de investigación para determinar las mejores variedades a partir de factores de calidad del cultivo. Los factores de calidad analizados fueron el peso de los racimos, la relación de aceite con respecto al racimo, la relación de frutos con respecto al racimo y los rendimientos de aceite en toneladas métricas (TM) por hectárea (ha) (Clare-Rhoades, 2011). Una vez que se seleccionaron las variedades de palma, se utilizó como base el proyecto experimental llevado a cabo en la Costa Norte de Honduras, desarrollado en un periodo de tres años para realizar los estudios de factibilidad. En el año de 1943, se inicia con la producción de palma aceitera en la zona de Parrita y Quepos, gracias a que las características agroecológicas del suelo cumplían con los requerimientos del cultivo, además de que el cultivo presentaba una alta tolerancia al sulfato de cobre. Posteriormente, el cultivo de palma se fue expandiendo a las antiguas fincas bananeros, alcanzando las regiones de Palmar y Coto en la zona sur del país (Clare-Rhoades, 2011).

En el informe realizado por el Ministerio de Agricultura y Ganadería (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2018), se muestra el estado actual de la actividad de palma aceitera en Costa Rica y se

contabiliza un total de 76 860 ha de terreno dedicadas al cultivo de palma. La región Brunca lidera la lista con una extensión de terreno dedicado a palma con un 64,5%, seguida por la región Pacífico Central con un 21,9%, la región Huetar Atlántica con un 9,8% y las regiones Central Sur y Huetar Norte con un 2,8% (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2018).

Es importante mencionar que en el periodo comprendido entre el 2008-2013, se observó un crecimiento sostenido en la expansión territorial del cultivo de palma en el país, siendo el año del 2012-2013 el más significativo ya que se alcanzaron las 72 000 ha de terreno, esto debido al aumento del precio internacional del aceite de palma (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2018).

3.3. Aprovechamiento de residuos del procesamiento de aceite

Se prevé que, a largo plazo el cambio climático traerá consigo un aumento en la frecuencia e intensidad de fenómenos meteorológicos extremos como sequías, inundaciones y tormentas, además de afectar en gran medida los ecosistemas debido a cambios en los patrones meteorológicos locales (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2018). Debido a esto, existe el desafío de producir alimentos suficientes con un clima cambiante que acrecienta la necesidad de la implementación de tecnologías agrícolas que contribuyan a la adaptación y resiliencia al cambio climático (IICA, 2016).

Es por ello que, se establece el marco conceptual de Agricultura Climáticamente Inteligente (ACI) para contrarrestar estos efectos negativos. Los pilares de la ACI contemplan el impulso de mejoras sostenibles en productividad, así como promover la resiliencia ante el cambio climático a través de la adaptación y mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2015).

La gestión sostenible de los suelos a partir de la ACI, tiene como objetivo la generación de sumideros de carbono en donde se secuestra el dióxido de carbono de la atmósfera y se reincorpora el carbono en los suelos y la vegetación. Además, se promueven las iniciativas que mejoren la disponibilidad de nitrógeno y nutrientes en el suelo, mediante la aplicación de abonos orgánicos y residuos del cultivo. Esto trae consigo una serie de beneficios a mediano y largo plazo, ya que no solamente se disminuye la dependencia de fertilizantes sintéticos, sino que los costos asociados por la compra de estos productos son menores y pueden ser más accesibles para los pequeños

productores (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2010, 2018).

Otro aspecto de gran importancia que se aborda en la ACI, es la captación y utilización del agua, en donde se promueve el uso de sistemas de riego eficientes para suplir la demanda hídrica de los cultivos y aumentar su productividad, además de utilizar lagunas o pozos de retención de agua de lluvia para manejar la problemática de irregularidades en las precipitaciones debido al cambio climático (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2010).

Por otro lado, la ACI debe implementar los postulados de la economía circular, la cual es un paradigma que busca la prosperidad económica, protegiendo al medio ambiente y previniendo la contaminación durante el ciclo de vida de los productos, por lo que conlleva al desarrollo sostenible (Prieto-Sandoval et al., 2017). El modelo circular busca eliminar los residuos del sistema, mantener los productos y materiales en uso y regenerar los sistemas naturales (Ellen Macarthur Foundation, 2017).

A diferencia de la economía lineal, la economía circular reincorpora los subproductos generados durante la línea de producción. En este enfoque, los subproductos agrícolas son revalorizados en la producción de compostaje, alimento para animales, o producción de enmiendas para retornar los nutrientes al suelo, entre muchos otros usos. Por lo tanto, se disminuyen los desperdicios y el requerimiento de otros materiales, como alimentos o fertilizantes químicos comerciales, y esto a su vez posee un impacto ambiental y económico, ya que tiene el potencial para considerarse un mejoramiento del negocio (Agrodite, 2020).

Dentro de los beneficios de la economía circular, se encuentran el crecimiento económico debido a la creación de valor, reducción de costos, incremento de la innovación, reducción de la emisión de gases efecto invernadero y la explotación de recursos naturales, impulsar sistemas agrícolas que mejoran los suelos, aire y uso del agua, así como la reducción de los desperdicios de alimentos (Agrodite, 2020).

Para el caso específico de la palma aceitera, los principales subproductos o residuos generados en la extracción de aceite son los racimos vacíos, las cenizas y los efluentes o lodos. Estos efluentes poseen un alto contenido de nutrientes, lo que los convierte en atractivos fertilizantes y esta

reincorporación de nutrientes al suelo ha contribuido a un incremento en rendimientos de cosecha de palma y mejoramiento en las propiedades del suelo (D. C. Molina y Anaya, 2018).

Las impurezas del fruto de la palma y los desechos obtenidos durante el procesamiento del producto pueden ser utilizados como fertilizante para las plantaciones (Bonomie y Reyes, 2012). Además, Lucero (2022) demuestra que es posible la elaboración de compost a partir de los residuos de la extracción de aceite de palma, como las fibras, el racimo vacío y los efluentes líquidos del proceso.

Anuente a esto, Macías (2017) cataloga a las fibras de la palma de aceite como un excelente suministro de materia orgánica debido a sus propiedades biológicas y su aprovechamiento para la disminución de la necesidad de fertilización de los cultivos. Lo anterior significa una ganancia ambiental y económica para los productores de palma.

Por otro lado, diversos autores (Bonomie y Reyes, 2012; Lucero, 2022; Macías, 2017) indican que el compostaje de los residuos de la extracción de aceite es uno de los mejores métodos de aprovechamiento de estos residuos y su devolución como materia orgánica, debido a que no logran descomponerse con facilidad de manera natural.

Las enmiendas orgánicas corresponden a productos carbonados de origen vegetal o animal que traen consigo una serie de beneficios en las condiciones de calidad del suelo. Las enmiendas orgánicas promueven la incorporación de materia orgánica en el suelo, mejoran las propiedades físicas y químicas, y promueven un aumento en la actividad biológica en este (Delgado-Londoño, 2017).

Las enmiendas orgánicas provienen de la transformación de residuos vegetales y que al agregarlos al suelo tienen la capacidad de mejorar las condiciones fisicoquímicas y biológicas del suelo, así como la productividad de un cultivo (Delgado-Londoño, 2017; Murillo-Montoya et al., 2020).

Mediante la aplicación de enmiendas orgánicas se puede mejorar la estructura, estabilidad de agregados y capacidad de retención de agua, por lo tanto, influye positivamente en las propiedades físicas del suelo. Aunado a esto, se contribuye en aspectos de aireación del suelo, lo cual permite el incremento en el desarrollo de microorganismos benéficos encargados de degradar la materia orgánica y el ciclaje de nutrientes en el suelo (C. García, 2008; Mosquera et al., 2010).

Por otro lado, en el estudio realizado por Delgado-Londoño (2017), se obtuvieron resultados positivos en las propiedades físicas del suelo asociadas a la erosión hídrica al utilizar enmiendas orgánicas. Además, Madrigal et al. (2020) muestra que el uso de materia orgánica al suelo de plantaciones de palma aceitera proveniente de las cenizas agroindustriales, mejora considerablemente las características fisicoquímicas del suelo y a su vez posee una respuesta fisiológica en el desarrollo de las plantas.

En el estudio de Cuevas et al., (2006) se indica que la aplicación de enmiendas orgánicas como lodos en suelos puede acarrear efectos en las propiedades físicas y que su efecto sobre las químicas y biológicas dependerá de la composición y método de aplicación de la enmienda. Además, indica que se pueden tener efectos negativos si no se aplican correctamente, como lo es la repelencia al agua, escorrentía y contaminación, por lo que el método de aplicación debe ser el correcto para evitar estas posibles afectaciones.

3.4. Calidad del suelo

La productividad del cultivo de palma aceitera constituye el resultado de una compleja interacción entre factores físicos, químicos y microbiológicos del suelo, los cuales, se ven afectados por las prácticas y manejo que se le proporciona al suelo y por la naturaleza o condiciones climáticas. La calidad del suelo se debe al balance entre los factores antes mencionados, no solo para la producción y desarrollo de los cultivos, sino también para la protección del ambiente y preservación de la biodiversidad (Furtak et al., 2019). La calidad del suelo se puede evaluar mediante los indicadores de calidad que corresponden a herramientas que brindan información cualitativa y cuantitativa sobre las propiedades, los procesos y las características del suelo (Y. García et al., 2012).

La calidad de los suelos se encuentra estrechamente relacionada con la fertilidad y capacidad del suelo para otorgar las características, condiciones y requerimientos nutricionales a las plantas, lo cual influye directamente sobre el crecimiento y productividad del cultivo. Entre las propiedades del suelo que determinan su calidad se encuentran las físicas, químicas y biológicas (Vallejo Quintero, 2013). El análisis de estas propiedades puede determinar una serie de aspectos necesarios para el manejo de la producción como aplicaciones de fertilizantes, prácticas de mantenimiento, riegos, drenajes, labranza, entre otros (Munévar-Martínez et al., 2016).

Entre los indicadores de calidad del suelo más importantes y de los cuales poseen mayor influencia sobre la producción se encuentra la compactación, la cual reduce la porosidad y con ello adecuada aireación e infiltración del agua en el suelo, provocando exceso de humedad bajo condiciones climáticas críticas (Pupin et al., 2009), así como la dificultad del movimiento hídrico y radicular. Estas condiciones de suelo toman mayor importancia en la producción de palma aceitera, la cual se ve principalmente afectada en presencia de baja aireación del suelo y exceso de humedad (Durán y Ortíz, 1995).

3.4.1. *Calidad física*

Las propiedades físicas del suelo son ampliamente estudiadas para la determinación de las condiciones a las que este se encuentra. La evaluación de las propiedades físicas es de gran importancia, debido a que permiten tomar decisiones para la implementación de medidas preventivas, restaurativas y de mejoramiento, frente a problemas de degradación (Volverás-Mambuscay et al., 2020). El estado de degradación del suelo está intrínsecamente relacionado a factores físicos, biológicos y químicos de este y pueden propiciar efectos negativos de compactación, pérdida en la fertilidad y materia orgánica, reducción de comunidades microbianas y erosión (Montiel y Ibrahim, 2016).

La condición física del suelo se encuentra relacionada con el uso eficiente del agua y el ciclo de nutrientes y pesticidas, por lo que una manera de cuantificarla es a través de indicadores de calidad (Navarro-Bravo et al., 2008). El estado de degradación de los suelos puede ser evaluado al analizar cambios en la densidad, porosidad, estructura e infiltración del agua (Novillo Espinoza et al., 2018). Dentro de los indicadores utilizados para determinar la calidad del suelo se encuentran la textura, densidad de partículas, densidad aparente, porosidad, la resistencia del suelo y la conductividad hidráulica.

La textura del suelo corresponde a la proporción de componentes inorgánicos en sus formas de arcilla, arena y limo. La importancia de la textura radica en la influencia que tiene esta propiedad sobre la fertilidad y la capacidad de retención de agua, drenaje y el contenido de materia orgánica (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2022).

Las partículas del suelo varían debido a su composición y su densidad. La densidad del suelo corresponde a la relación existente entre la masa total del sólido y el volumen ocupado (Flores-Delgadillo y Alcalá-Martínez, 2010).

Con respecto a la densidad de las partículas, esta es utilizada en la determinación de la densidad real del suelo y para su cuantificación se emplean el picnómetro o matraz volumétrico. Es importante mencionar que los valores típicos de densidad de las muestras del suelo varían de 2,5 a 2,8 g/cm³ (Flores-Delgadillo y Alcalá-Martínez, 2010).

Por otra parte, la densidad aparente consiste en la relación entre la masa seca del suelo (fase sólida) y el volumen total, contemplando el espacio poroso. La utilidad de esta propiedad consiste en examinar la facilidad con la que las raíces penetran el suelo, así como determinar la porosidad total al conocer la densidad de las partículas (Flores-Delgadillo y Alcalá-Martínez, 2010). Además, la densidad aparente es utilizada como indicador de la calidad, ya que permite determinar alteraciones como la compactación en el suelo debido a actividades antrópicas como lo son el manejo y trasiego del producto en campo y la utilización de maquinaria agrícola (Novillo Espinoza et al., 2018).

El espacio poroso del suelo corresponde al porcentaje del volumen del suelo que no es ocupado por la fase sólida (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2022). La porosidad se puede describir con la ecuación 1 (Flores-Delgadillo y Alcalá-Martínez, 2010):

$$Porosidad = \varphi = \frac{Volumen\ de\ huecos\ o\ vacíos}{Volumen\ del\ suelo} \quad Ecuación\ 1$$

La porosidad está constituida por macroporos y microporos que permiten el movimiento o retención del agua, airea, gases y nutrientes (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2022). La reducción de la porosidad debido a la compactación trae consigo problemas de menor aireación del suelo, al mismo tiempo de reducir la capacidad de infiltración de agua y dificultar la penetración de las raíces (Flores-Delgadillo y Alcalá-Martínez, 2010). Lo anterior repercute en gran medida sobre el potencial de producción del cultivo.

La resistencia del suelo es un indicador de que tan compactado está el suelo. Cuanto menor sea el grado de compactación de un suelo, habrá más oxígeno disponible para la vida microbiana del

suelo y las raíces de las plantas, los nutrientes y el agua, tendrán más facilidad para penetrar a través del suelo.

Otro indicador para determinar la calidad física corresponde a la conductividad hidráulica saturada, en donde se evalúa la capacidad del suelo para conducir el flujo de agua a través de sus poros en condiciones de saturación (Flores-Delgado y Alcalá-Martínez, 2010). Este indicador depende de la porosidad, permeabilidad y el grado de saturación presente. Por otra parte, el indicador de infiltración determina la velocidad de descenso del agua en el suelo a través del tiempo (Alvarado-Batres y Barahona Palomo, 2017). De manera general, la velocidad de infiltración es máxima al comienzo de los ensayos y tiende a estabilizarse con el tiempo (Forsythe, 1985).

3.4.2. Calidad química

Las propiedades químicas del suelo se pueden evaluar a partir de indicadores de calidad, los cuales están relacionados con aspectos como la interacción entre el suelo y la planta, la disponibilidad y calidad del agua y nutrientes para las plantas y microorganismos, y la capacidad amortiguadora del suelo (Calderón-Medina et al., 2018).

El carbono es un parámetro de gran utilidad para la evaluación de la condición de calidad y funciones del suelo, no solamente en aspectos agrícolas como la producción, sino en aspectos ambientales relacionados a la captura de carbono, la mejora de la calidad del aire y mitigación de los efectos del cambio climático (Michel, 2002; Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2019).

Los macronutrientes y micronutrientes del suelo juegan un papel crucial en la producción y desarrollo de los cultivos debido a su influencia en la fertilidad del suelo. Los macronutrientes afectan los procesos de los seres vivos del suelo y se dividen en primarios como el nitrógeno, fósforo, y potasio, mientras que los secundarios son calcio, magnesio y azufre (Zambrano-Yepes et al., 2020). Por otra parte, los micronutrientes están relacionados a la regulación de procesos metabólicos mediante enzimas, como lo son la respiración, fotosíntesis y síntesis de clorofila. Entre los micronutrientes de mayor importancia se encuentran el zinc, cobre, hierro y manganeso (Torri et al., 2010).

El nitrógeno corresponde al factor limitante del crecimiento del follaje de los cultivos. Como lo mencionan (Benimeli et al., 2019), su deficiencia provoca un desarrollo inmaduro de los cultivos,

acompañado de un estado raquítrico, desarrollo y tamaño pequeño de sus hojas, y presentar afectaciones como la clorosis. En el escenario opuesto, la provisión en exceso del nitrógeno está relacionado con un crecimiento excesivo vegetal del cultivo, esta condición puede retardar el estado de maduración de las plantas y aumentar la susceptibilidad a enfermedades y plagas, ya que los tejidos se mantienen un periodo mayor en su estado inmaduro. Los escenarios antes mencionados, constituyen un gran impacto en la productividad y salud de los cultivos.

El fósforo en la palma aceitera constituye un agente encargado del crecimiento y desarrollo radicular de la planta, además de participar en los procesos de floración del cultivo (Mariategui, 2012; Technoserve, 2019).

El potasio cumple una serie de funciones de gran importancia, ya que posee gran influencia en el crecimiento y cantidad de frutos producidos, por lo que su deficiencia repercute en el rendimiento de los cultivos. Además, controla el movimiento del agua dentro de la planta, mediante la apertura y cierre de los estomas, de vital importancia en condiciones de sequía y otorga resistencia ante enfermedades (Mariategui, 2012; Technoserve, 2019).

El calcio interviene junto al boro en funciones de división celular y estabilidad de la pared celular, por lo que es de gran importancia en tejidos de crecimiento activo como el tallo, las raíces y tejidos radiculares (Santacruz, 2021; Technoserve, 2019).

El magnesio corresponde al elemento principal en los procesos vitales de la palma aceitera, como los son la fotosíntesis, la respiración y el metabolismo (síntesis de almidón, proteínas y vitaminas). El magnesio consiste en el átomo central de la molécula de clorofila e interviene en la reacción de la carboxilasa, la cual está encargada de fijar el CO₂ en los procesos metabólicos de respiración. La clorofila es la responsable de capturar la energía proveniente del sol mediante la fotosíntesis, además de otorgarle la pigmentación verde a las hojas (Mariategui, 2012; Technoserve, 2019).

El azufre cumple varias funciones importantes en la palma aceitera, debido a que promueve la producción de semillas y del fruto, así como el crecimiento enérgico del cultivo. Además, constituye un componente indispensable de las proteínas y participa en la síntesis de vitaminas para el cultivo (Mariategui, 2012; Technoserve, 2019).

El zinc es un elemento que participa en la síntesis de hormonas encargadas del crecimiento y desarrollo del cultivo, de los frutos y la flores. Además, es un agente estabilizador de la clorofila

y los procesos energéticos en el metabolismo de glucosa y oxidación. La deficiencia de este elemento repercute en el buen aprovechamiento y asimilación del nitrógeno y fósforo en el suelo (G.J, 2019).

El cobre cumple una serie de funciones de gran importancia en la planta, debido a que participa en la formación de semillas viables, además de promover la síntesis de proteínas, las cuales constituyen enzimas que actúan como catalizadores en la respiración celular. Las altas concentraciones de este elemento pueden causar toxicidad (G.J, 2019).

El hierro corresponde a un elemento fundamental en la respiración y generación de energía en la planta, debido a que es un cofactor de enzimas que participan en el ciclo de Krebs. Además, participa en la reducción de nitratos y sulfatos. La deficiencia del hierro en palma de aceite es raramente visto en suelos tropicales, ya que suelen encontrarse en condiciones óptimas de este elemento. Se ha observado que la deficiencia de hierro en palma de aceite viene acompañada de la aparición de manchas amarillas y puntos blancos, en donde las plantas con estados avanzados de clorosis pueden presentar hojas completamente amarillas y blancas. Aunado a esto, trae consigo problemas de fragilidad, marchitez, reducción del crecimiento y hasta la muerte de las palmas (Tiemann et al., 2018).

El manganeso participa en procesos muy importantes para el desarrollo óptimo de la palma como los son la fotosíntesis, respiración y en la asimilación del nitrógeno. Además, se ha observado que interviene en la germinación del polen, promueve el desarrollo radicular y otorga resistencia ante patógenos que atacan las raíces. La deficiencia del manganeso en la planta provoca una reducción en la actividad fotosintética, así como un crecimiento radicular inhibido acompañado con un aumento en la susceptibilidad a enfermedades en las raíces (Tiemann et al., 2018).

El pH corresponde a una propiedad química del suelo que debe de monitorearse continuamente, ya que puede generar efectos negativos en el desarrollo radicular y del cultivo de palma aceitera, si no se encuentra dentro de rangos óptimos. Los niveles adecuados de pH deben rondar los valores de pH de 4 y 6, y su valor óptimo se alcanza a los 5,5 (Vásquez-Granda, 2001). En el caso de que el pH se encuentre en valores cercanos a 3 puede afectar el crecimiento y desarrollo radicular del cultivo. La alta acidez propicia una disminución en la disponibilidad de los contenidos de Ca, fosfatos y molibdatos y un aumento en las concentraciones de Al, Mn y Fe solubles. Además, altos

niveles de alcalinidad pueden dificultar la absorción de nutrientes como el Fe, Mn, B, Zn, Cu y fosfato por parte de las raíces, ya que se encuentran en formas insolubles (Owen-Barletto, 1995).

3.4.3. Calidad biológica

Las propiedades microbiológicas del suelo se utilizan como otro indicador de la calidad, aspectos como la biomasa y actividad microbiológica, actividad enzimática, conteo de algunos microorganismos, entre otros. La actividad microbiológica y enzimática del suelo, se ve sensiblemente afectada por los cambios abruptos en las condiciones ambientales, principalmente debido a la compactación del suelo. Esto conlleva a una afectación en la producción del cultivo, debido a la disminución de la biomasa y actividad microbiana y con ello, la disponibilidad de nutrientes para las plantas (Pupin et al., 2009).

Los microorganismos son esenciales para llevar a cabo funciones del suelo, ya que participan en reacciones metabólicas y en el suministro de energía y nutrientes aprovechables por las plantas. Las propiedades microbiológicas responden de manera rápida y sensible a los cambios en las condiciones del suelo, lo cual lo convierten en un indicador anticipado de calidad (Paolini, 2018).

En cuanto a los indicadores microbiológicos para la determinación de la calidad del suelo, la biomasa y la actividad microbiana son dos aspectos de importancia, que se deben considerar para determinar el estado del suelo y por lo tanto su calidad y fertilidad para la producción (Pardo-Plaza et al., 2019).

En lo que respecta a la biomasa microbiana, esta se ve afectada por la cantidad de materia orgánica presente en el suelo y por factores climáticos, de manejo y de propiedades físicas y químicas del suelo, lo cual la convierten en un indicador sensible a las alteraciones en los factores anteriormente mencionados (Iglesias, 2008).

La respiración es el proceso en el cual los microorganismos presentes en el suelo oxidan los compuestos orgánicos produciendo dióxido de carbono, esta descomposición de materia orgánica del suelo produce nutrientes asimilables por las plantas (Durango et al., 2015), por lo tanto, juega un papel muy importante en la fertilidad del suelo y la producción del cultivo. Por otro lado, las bacterias fijadoras de nitrógeno poseen la capacidad de captar el nitrógeno gaseoso atmosférico y convertirlo en amoníaco o amonio, por lo que proveen al suelo de nitrógeno disponible para las plantas, con lo cual promueven el crecimiento de los cultivos (Galindo y Romero, 2010).

3.5. Estudios comparativos de la adición de enmiendas orgánicas y fertilización convencional en los sistemas productivos

En el estudio realizado por Guilcamaigua-Paztuñal y Chancusig-Espín (2016), se muestra una comparativa entre una serie de indicadores de calidad agrícola en manejos tradicional, orgánico y convencional. De manera general, los autores obtuvieron resultados óptimos en los indicadores de calidad del suelo para el escenario orgánico frente al convencional. Se observaron valores más altos para los indicadores de materia orgánica, nutrientes del suelo y en aspectos de productividad en el escenario orgánico y valores medios para la agricultura convencional. Esto permite concluir, que el manejo orgánico de los cultivos es un factor determinante que permite mejorar las condiciones del suelo y aumentar la productividad de los cultivos, al mismo tiempo en el que se disminuye la concentración de químicos en el suelo.

Además, se ha observado que la aplicación de enmiendas orgánicas en los cultivos trae consigo una serie de beneficios sobre la productividad, al mejorarse las características físicas, químicas y microbiológicas en el suelo (Murillo-Montoya et al., 2020).

Otro estudio comparativo realizado por Marín et al. (2017) en el cultivo de papa, mostró una mayor concentración de materia orgánica en el manejo orgánico frente al manejo convencional, así como una mayor cantidad de unidades formadoras de colonias de bacterias y hongos. Además, menciona que el uso intensivo de fertilizantes inorgánicos en suelos convencionales puede llegar a ser contraproducente y afectar el óptimo desarrollo de comunidades de microorganismos.

En el estudio realizado en pejibaye por Chaimsohn et al. (2007), se observó un desarrollo radicular significativamente mayor en las parcelas donde se aplicaron enmiendas orgánicas en comparación al manejo de fertilización convencional.

Además, se ha observado en estudios realizados en monocultivos de *Gypsophila* por Vázquez et al. (2020) que el uso de enmiendas orgánicas aumentó el contenido de materia orgánica, se presentaron niveles más altos de P disponible, hubo un efecto amortiguador en el pH y se observó una disminución en la densidad aparente. En adición, se observó un aumento en el peso fresco de tallos en el cultivo con manejo de enmiendas orgánicas.

Por otra parte, es importante mencionar que, en palma adulta, los insumos deben ser aplicados sobre la mayor superficie posible de raíces absorbentes (principalmente raíces cuaternarias) en la

interlínea, debido a que los nutrientes son absorbidos mediante el proceso de difusión y acción de masa (Owen-Barlett, 1992).

3.6. Descripción de la empresa

La empresa Palma Tica S.A. pertenece a Grupo Agroindustrial Numar S.A., conglomerado productor y comercializador de productos derivados del aceite de palma aceitera. Además, posee gran representación de sus marcas en países como México, Centroamérica y Colombia.

Según datos del MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2018), Palma Tica S.A. procesa el 75% de la fruta que se produce en el país, proveniente tanto de fincas propias como de productores independientes. La empresa cuenta con dos zonas de producción, la División Quepos, ubicada en el Pacífico Central y la División Coto, en la Zona Sur, también se cuenta con producción en el Atlántico, la cual es perteneciente a la División Quepos. En la División Quepos se cuentan con dos distritos, los cuales corresponde a Damas con un área de siembra de 4616,03 ha y Naranja con 4300,80 ha.

4. METODOLOGÍA

4.1. Sitio de estudio

El presente estudio se realizó en las plantaciones de palma aceitera, en la finca Nicoya de la empresa Palma Tica S.A., Distrito Damas, División Quepos, provincia de Puntarenas, ubicado en el Pacífico central del país y el orden de suelos de la zona corresponde a inceptisol. En la Figura 1 se puede apreciar la ubicación de las tres parcelas de estudio de cada uno de los lotes.

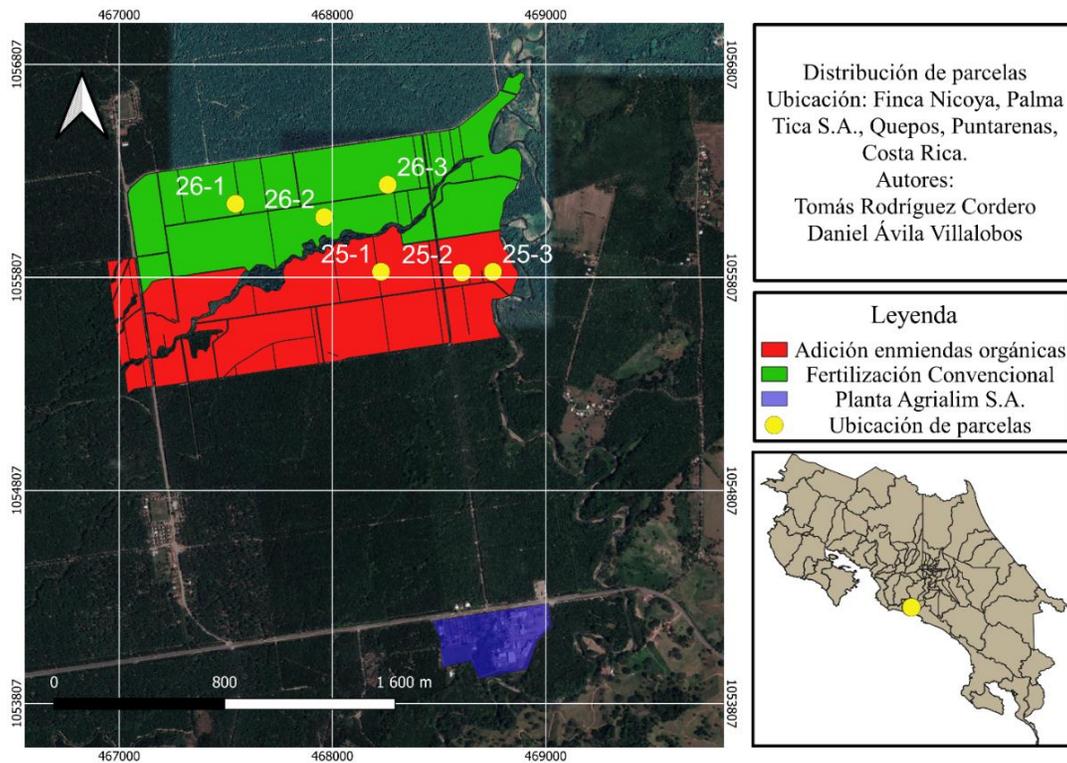


Figura 1. Distribución de parcelas de investigación, Finca Nicoya, División Quepos, Palma Tica S.A. (Proyección CRTM05).

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT) y Palma Tica S.A.

A partir de los datos recopilados de las estaciones meteorológicas de Palma Tica S.A., se determinó que, para el periodo en que se realizó el estudio, comprendido entre los meses de mayo y julio del año 2022, se tienen los siguientes valores promedio: humedad relativa del 91,7%, precipitación de 17,9 mm y radiación solar de 13,5 MJ/m²día. Además, se presentaron temperaturas mínimas de 22,10° C, máximas de 32,20° C y promedio de 26,28° C.

Por otro lado, es importante destacar que la distribución de siembra de las palmas en campo se realiza en triángulo, técnica conocida popularmente como “Pata de gallo” a nueve metros de distancia entre palmas (Figura 2, a). Además, el diseño de los caminos y drenes en los lotes y parcelas se observa en la Figura 2, b). Cada una de las parcelas de estudio se compuso de un centro frutero (CF), el cual posee un total de siete palmas de ancho, para un total de cinco interlíneas entre palmas.

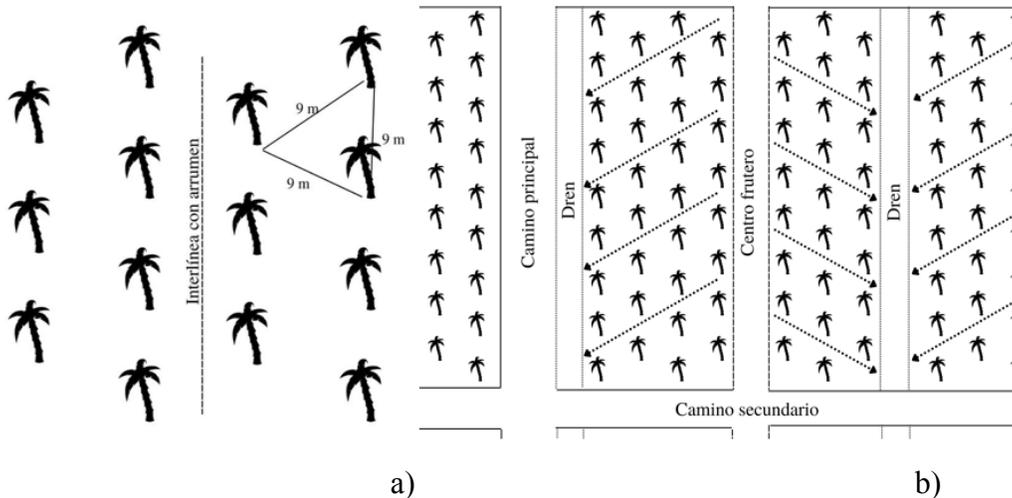


Figura 2. a) Distribución y distancia entre palmas. b) Distribución de parcelas.

Fuente: Elaboración propia.

4.2. Tratamientos evaluados

Se evaluaron dos tratamientos enfocados en el manejo agronómico implementado, los cuales corresponden:

Tratamiento de fertilización convencional: Es el manejo típico utilizado en las plantaciones. Corresponde a una dosificación de una formulación comercial de fertilizantes. La dosis de fertilizantes es de 6-7 kg/planta, lo que equivale a 858-1001 kg/ha.

Tratamiento de adición de enmiendas orgánicas: Las enmiendas orgánicas son subproductos del proceso de extracción de aceite de la fruta de palma. La empresa Palma Tica S.A. reduce la dosis de aplicación de fertilizantes convencionales en estos lotes y adiciona estos subproductos como enmiendas orgánicas al suelo. La aplicación se realiza en un mismo lote con alguno de los siguientes dos tipos de enmiendas, según la disponibilidad.

- Lodos: provenientes de la planta de tratamiento de aguas residuales de la planta de extracción de aceite de la empresa. Se aplica una dosis de 55 ton/ha.
- Fibra: proveniente de la extracción de aceite. Se aplica una dosis de 25 ton/ha.

En el caso de las enmiendas orgánicas, las fibras son provenientes de la planta extractora de aceite Agrialim S.A. y los lodos depurados de la planta de tratamiento de la empresa Palma Tica S.A.. El manejo que reciben los lodos, según fue explicado por el supervisor de servicios agrícolas (Masís-Azofeifa, 2022), los lodos se bombean desde las lagunas de oxidación hasta las lagunas de secado. Esto se realiza en el mes de enero y los lodos se dejan secar en un periodo de 30 días aproximadamente (se desconoce el dato de contenido de humedad de los lodos al finalizar el periodo de reposo). Para la extracción de los lodos de las lagunas de secado se emplea una retroexcavadora tipo backhoe, se llena la pala y se trasladan a los lotes cercanos para su depósito en puntos de fácil acceso en los lotes. La aplicación de los lodos se realiza en lotes cercanos debido a los costos de transporte y manejo asociados, ya que los lodos pueden presentar altos contenidos de humedad que pueden dificultar el traslado. La aplicación y distribución de los lodos en campo no se realiza de manera homogénea, por lo que se depositan en cúmulos sin esparcir.

Por otro lado, como se puede observar en la Tabla 1, la adición de enmiendas orgánicas (lote 25) es variable en el tipo de insumo aplicado y el periodo de tiempo entre aplicaciones, ya que en el lote se aplicaron de manera intercalada fibras seguidas de lodos, más no se realizó en años consecutivos.

Tabla 1. Adición de enmiendas orgánicas en el lote 25 en los últimos 5 años.

Año	Aplicación
2016	Fibra
2017	Lodos
2019	Fibra
2021	Lodos

4.3. Parcelas experimentales y muestreo

Se seleccionaron dos lotes, uno con manejo convencional de aplicación de fertilizantes y otro con adición de enmiendas orgánicas. La selección de lotes se realizó a partir de criterios que se observan en la Tabla 2. Se estudiaron dos lotes de la finca Nicoya, la cual cuenta con una extensión

total de 785 ha sembradas distribuidas en 15 lotes. Se evaluaron el lote 25 (aplicación de enmiendas orgánicas) con una extensión de 91,52 ha y el lote 26 (convencional) con extensión de 83,59 ha.

Tabla 2. Criterios de selección de lotes.

Suelo	Inceptisoles
Topografía	Plano, similar
Edad de plantación	22 años
Variedad	Deli x Ekona
Densidad de siembra	143 plantas/ha
Adición de enmiendas	Mínimo 5 años

En cada uno de los dos lotes se demarcaron tres parcelas experimentales aleatorias y separadas de 100m x 100m (réplicas en campo). De cada parcela experimental se obtuvieron cinco muestras compuestas de ocho puntos de muestreo aleatorios en la interlínea entre palmas con acumulación de hojas y residuos orgánicos (arrumen). Las muestras se tomaron a una profundidad de 0-20 cm. Las muestras se empacaron en bolsas de polietileno, se sellaron y rotularon para ser trasladadas a los laboratorios respectivos para su procesamiento y análisis.

Para la selección de las parcelas experimentales, se realizaron visitas a campo para determinar los sitios o centros fruteros, que mantuvieran condiciones similares a simple vista. Se evitaron los centros fruteros con excesivo o deficiente arrumen y cúmulos de suelo que impidieran el libre tránsito por las interlíneas. Se utilizaron estacas de madera para la demarcación de las parcelas e interlíneas de muestreo y facilitar su visibilidad en campo.



Figura 3. Estacas para demarcación de parcelas.

4.4. Indicadores físicos evaluados

4.4.1. Densidad aparente y porosidad

El método para la determinación de la densidad aparente corresponde al método del cilindro utilizado por (Rubio Gutiérrez, 2010). Para nuestro estudio se utilizaron cilindros plásticos PVC con dimensiones de 5,08 cm (2 pulgadas) de diámetro con 4 cm de altura y se introdujeron en el suelo para obtener una muestra sin perturbar. El cilindro se guardó en una bolsa resellable y se llevó la muestra al laboratorio para determinar el peso del suelo seco al calentarlo en el horno a 105 °C durante 48 horas o hasta alcanzar el peso constante. La densidad aparente se determinó con la ecuación 2 (García Centeno, 2017):

$$Da = \frac{M_{ss}}{V} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

Da: densidad aparente del suelo (g/cm^3)

Mss: masa o peso del suelo seco (g)

V: volumen del cilindro (cm^3)

La porosidad del suelo se puede determinar al conocer la densidad aparente y densidad de partícula con la ecuación 3 (Danielson y Sutherland, 1986). Es importante mencionar que para el presente estudio se utilizó un valor de $2,65 \text{ g/cm}^3$ para la densidad de partícula del suelo.

$$S_t = \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_p} \right) \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

S_t : porosidad total

ρ_a : densidad aparente del suelo (g/cm^3)

ρ_p : densidad de partícula (g/cm^3)

4.4.2. Conductividad hidráulica

La determinación de la conductividad hidráulica saturada se realizó mediante el método del permeámetro de carga constante (Gabriels et al., 2006), en donde se tomaron muestras inalteradas

del suelo en cilindros de PVC y se llevaron al laboratorio. Los cilindros son saturados con agua por capilaridad en una bandeja por al menos 12 horas para alcanzar una completa saturación (Flores-Delgadillo y Alcalá-Martínez, 2010). Una vez saturado el suelo, se coloca sobre el permeámetro y se le hace percolar agua desde un tanque y se mantiene una carga constante. El agua percolada es recolectada y medida en una probeta volumétrica y se registra el tiempo transcurrido hasta el momento (Flores-Delgadillo y Alcalá-Martínez, 2010; Gabriels et al., 2006). Para este indicador, se enviaron las muestras al laboratorio de suelos de la empresa Palma Tica S.A. localizado en la División Coto.

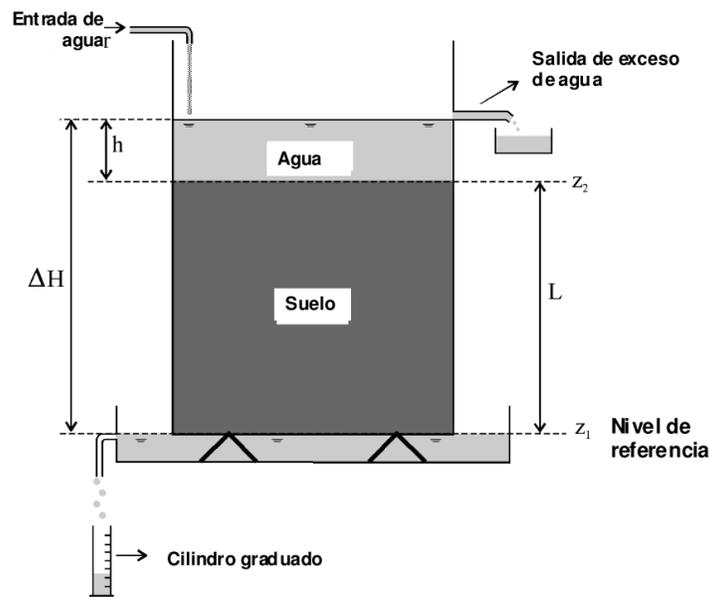


Figura 4. Esquema del permeámetro de carga constante.

Tomado de (Gabriels et al., 2006).

La conductividad hidráulica se determina a partir de la ecuación 4:

$$K_s = \frac{V}{A \cdot \Delta t \cdot \left(\frac{h+L}{L}\right)} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

K_s : conductividad hidráulica saturada (cm/h)

h : carga de agua que se mantiene constante por encima del nivel superior del cilindro de suelo (cm)

L: altura del cilindro de suelo (cm)

Δt : tiempo transcurrido desde que comenzó a recogerse el agua percolada hasta la medición final del volumen (V) (horas)

V: volumen de agua recogido en el cilindro graduado (cm³)

A: área de la sección transversal del cilindro (cm²)

4.4.3. Infiltración

La determinación de la infiltración se realizó a partir del método de Porchet utilizado por Mora-Chacón (2019), en donde se excavó un agujero cilíndrico de 17 cm de diámetro y profundidad de 30 cm en el terreno (Rosales-Escalante, n.d.). Se emplearon los tiempos utilizados por Mora-Chacón (2019) para determinar la infiltración, los cuales corresponden los 5, 10, 20, 30, 45, 60, 90 y 120 minutos y se continuó la medición hasta haber completado un tiempo de 3-4 horas.

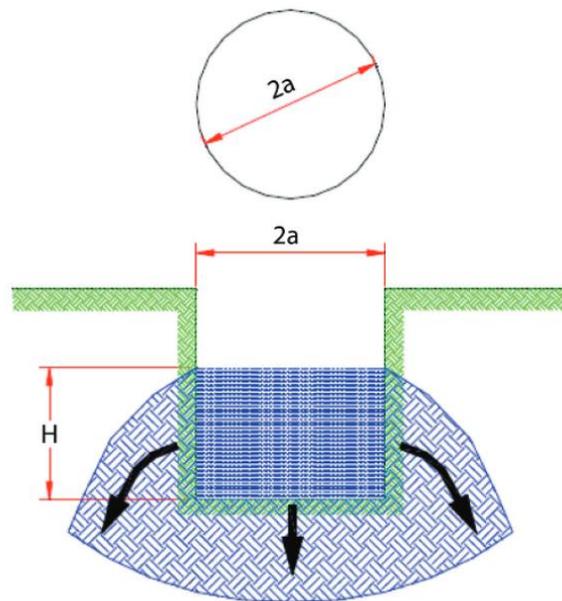


Figura 5. Esquema del método de Porchet para la determinación de infiltración en campo.

Tomado de Alvarado-Batres y Barahona-Palomo (2017)

La infiltración del suelo se determinó con la ecuación 5 (Alvarado-Batres y Barahona-Palomo, 2017):

$$Inf = \frac{a}{2 \cdot (t_2 - t_1)} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot H_1 + a}{2 \cdot H_2 + a}\right) \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

a: radio (cm)

H_1 : profundidad inicial (cm)

H_2 : profundidad final (cm)

t_1 : tiempo inicial (min)

t_2 : tiempo final (min)

4.4.4. Resistencia a la penetración

La resistencia del suelo se determinó in situ utilizando el penetrómetro estático. Con este equipo es posible cuantificar el esfuerzo (fuerza de área por sección transversal) necesario para introducir lentamente un pistón hasta una profundidad determinada (Forsythe, 1985). Al momento de toma de muestras se debe de aplicar una presión uniforme sobre las agarraderas del penetrómetro y empujar el cono hacia el suelo a una velocidad constante de 2 cm/s (Eijkelkamp, n.d.). La resistencia a la penetración se determinó con la ecuación 6:

$$\text{Resistencia del cono} = \frac{\text{Lectura del manómetro (N)}}{\text{Área base del cono (cm}^2\text{)}} \quad \text{Ecuación 6}$$

4.4.5. Materia orgánica

Para la determinación de la materia orgánica se utilizó el método de pérdida de peso por ignición (WLOI Weight-Loss-On-Ignition) utilizado por Esquivel et al. (2013), donde se seca una muestra de 10 g de suelo por 24h a 105°C y se obtiene su peso seco. Posteriormente se calcinan en una mufla a 450°C por 24h y se pesa la muestra una vez alcance la temperatura ambiente. El contenido de materia orgánica se determinó utilizando la ecuación 7.

$$MO(\%) = \frac{PSS_{105} - PSC_{450}}{PSS_{105}} \times 100 \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

PSS_{105} : Peso seco del suelo (g)

PSC_{450} : Peso calcinado del suelo (g)

4.5. Indicadores microbiológicos evaluados

Para los análisis de los indicadores microbiológicos, las muestras de suelo fueron enviadas al Laboratorio de Microbiología Agrícola del Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la Universidad de Costa Rica.

4.5.1. Actividad microbiana

Con la metodología de Anderson (1982) utilizada por Durango et al. (2015), que consiste en incubar la muestra junto con NaOH y agua durante 8 días, posteriormente determinar la cantidad de CO₂ generado y que fue absorbido en el NaOH, adicionando BaCl, fenolftaleína y titulado con HCl.

4.5.2. Biomasa microbiana

Mediante la metodología de fumigación extracción descrita por Vance et al. (1987) y utilizada por Durango et al. (2015), la cual consiste en tomar una muestra control y una fumigada. A la muestra control se adiciona K₄SO₂ y se filtra con papel Whatman 42. La otra muestra se fumiga con cloroformo libre de etanol y se incuba. Al extracto se le adiciona de K₂Cr₂O₇, HgO y una mezcla ácida. Posteriormente ambas muestras se digieren, se adiciona agua y fenontralina y se valora el exceso de K₂Cr₂O₇ con sal de Morh.

4.5.3. Recuento de fijadores de nitrógeno

Se realizan disoluciones seriadas inoculadas en medios de Burk. Consta de preparar una disolución con una concentración baja de soluto mediante diluciones sucesivas en tubos de ensayo hasta alcanzar la concentración deseada.

4.5.4. Recuento de hongos

Al igual que en el recuento de fijadores de nitrógeno, se realizan disoluciones seriadas, en este caso inoculadas en medios de Papa Dextrosa Agar (PDA).

4.6. Indicadores químicos evaluados

Para los análisis de los indicadores químicos, las muestras de suelo fueron enviadas al Laboratorio de Suelos y Foliaves del Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la Universidad de Costa Rica.

4.6.1. *Macronutrientes y micronutrientes*

La determinación de nitrógeno se realizó a partir del método de combustión seca de Dumas, en donde la muestra del suelo es incinerada a temperaturas de 900-1000 °C o 1400-1600 °C bajo una atmósfera de oxígeno puro (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2019). El procedimiento se llevó a cabo utilizando el equipo autoanalizador Elemental vario MACRO cube que permite la determinación simultánea de CHNS a partir de una misma muestra de suelo. El principio de funcionamiento del dispositivo corresponde a la separación gaseosa a través de columnas trampa selectivas, las cuales capturan con alta precisión las concentraciones gaseosas desprendidas durante la incineración para cada elemento analizado (Elementar, 2022).

Además, se realizó el procedimiento de extracción Mehlich 3, el cual es empleado para determinar la concentración de macronutrientes (Ca, Mg, K, P, S y N) y micronutrientes (Zn, Cu, Fe, Mn) en suelo, así como el pH (Mehlich, 1984; ÚKZUZ et al., 2014).

4.6.2. *Carbono*

Posteriormente, a partir de la materia orgánica obtenida anteriormente, se determinó el carbono en el suelo mediante la ecuación 8.

$$\text{Carbono} = \frac{VS \times Da \times MO\%}{2} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

VS: Volumen de suelo (m^3ha^{-1})

Da: Densidad aparente (Mg m^{-3})

MO: Materia orgánica (%)

4.7. *Productividad de los lotes en estudio*

Se extrajeron los datos anuales de producción (ton/ha), peso promedio de racimo (kg) y densidad de racimos por ha registrados por Palma Tica S.A. en los lotes experimentales bajo estudio en el periodo comprendido entre los años 2015-2021. Posteriormente, se realizó un análisis del efecto de los manejos agronómicos estudiados y cómo las propiedades físicas, químicas y microbiológicas del suelo evaluadas podrían haber influenciado sobre la productividad del cultivo.

4.8. Índice de calidad de suelo aditivo (ICSA)

Se calculó el Índice de Calidad del Suelo Aditivo (ICSA) (Andrews et al., 2002; Chavarría et al., 2012) con el fin de determinar cuál de los tratamientos o lotes posee una mejor calidad de suelo con base en los indicadores físico-químicos y microbiológicos mencionados anteriormente. Estos indicadores se dividen en dos grupos, el primero en donde los valores altos son considerados como buenos y el segundo donde los valores bajos son considerados como buenos.

Para esto se calculó inicialmente el índice de calidad del suelo (ICS) a partir de las ecuaciones 9 y 10, donde se obtienen valores de 0-1. Finalmente se determina el ICSA mediante la sumatoria de todos los ICS. El valor mayor de ICSA indica una mejor calidad del suelo.

$$\text{Valor alto mejor: ICS} = \frac{\text{valor de cada indicador}}{\text{valor más alto del indicador}} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$\text{Valor bajo mejor: ICS} = \frac{\text{valor más bajo indicador}}{\text{valor de cada indicador}} \quad \text{Ecuación 10}$$

4.9. Posibles acciones de mejora

Se realizó una propuesta de recomendaciones para optimizar el manejo de los suelos y productividad de las plantaciones bajo estudio. Estas recomendaciones fueron específicamente para el mejoramiento de los indicadores físicos, químicos y microbiológicos. Las recomendaciones se enfocaron en acciones de manejo de cultivo que sean posibles de realizar en las plantaciones de palma aceitera de la empresa.

4.10. Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó mediante el software SigmaPlot 14.5 con un valor p de 0,05. Primero se analizó la normalidad de los datos, mediante la prueba de Shapiro-Wilk modificado. En los datos que no siguieron normalidad se aplicaron las transformaciones logarítmica, raíz cuadrada e inversa. Debido a la no normalidad de los datos se determinó que se utilizarían pruebas no paramétricas.

Primero se realizó un análisis interno de cada tratamiento (manejo convencional y adición de enmiendas orgánicas). Se realizó una prueba de Kruskal-Wallis para determinar si existen diferencias significativas entre las parcelas experimentales de un mismo tratamiento o lote, seguido

por una prueba post-hoc de Tukey para determinar las diferencias entre dichas parcelas que presentaron valores p menores a 0,05.

Si para un mismo tratamiento los parámetros evaluados en las parcelas experimentales presentaron diferencias significativas se procedió a analizar individualmente cada tratamiento.

En los casos que los parámetros evaluados en las parcelas experimentales no presentaron diferencias significativas, se unificaron los datos de las tres parcelas para comparar entre tratamientos (manejo convencional y adición de enmiendas orgánicas) mediante la prueba de Mann-Whitney.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Análisis comparativo entre tratamientos: aplicación de enmiendas orgánicas y manejo convencional

5.1.1. Indicadores físicos

Se procedió a realizar el análisis estadístico interno para determinar diferencias entre las parcelas experimentales con el fin de determinar cuáles parámetros pueden ser utilizados para comparar entre tratamientos. Los resultados se muestran en la Tabla 3. Como se observa en esta tabla solo el parámetro de conductividad hidráulica puede ser utilizado para esta comparación entre tratamientos. En el caso de los demás parámetros lo que indican estos resultados es una alta variabilidad interna (variabilidad entre parcelas experimentales), este tema se retomará más adelante y se analizarán individualmente los tratamientos, con el fin de dar paso acá a la comparación entre manejos productivos.

Tabla 3. Valores p obtenidos en los indicadores físicos de calidad de la prueba estadística no paramétrica Kruskal-Wallis para las parcelas experimentales de cada lote de estudio.

Indicador físico	Tratamiento de adición de enmiendas orgánicas	Tratamiento de fertilización convencional
Densidad aparente y porosidad (%)	0,0093	0,4500
Conductividad hidráulica	0,3289	0,1788
Infiltración	0,2300	0,0157
Resistencia a la penetración	<0,0001	0,0008
Materia Orgánica (%)	0,0340	0,0370*

Valor $p < 0,05$ corresponde a que se observaron diferencias estadísticas significativas entre las parcelas experimentales dentro de un mismo lote.

*En el caso de la materia orgánica, mediante el análisis de Kruskal-Wallis se determinó que sí existen diferencias significativas entre las parcelas con fertilización convencional, por lo que se procedió a realizar el análisis de comparación múltiple (Test de Tukey). Empleando el análisis de comparación múltiple, se determinó que no existen diferencias estadísticas significativas en tre las parcelas bajo este manejo agronómico.

En la Tabla 4 se presentan los valores obtenidos para el indicador físico de conductividad hidráulica bajo los tratamientos agronómicos de adición de enmiendas orgánicas y fertilización convencional.

Tabla 4. Conductividad hidráulica promedio obtenida para la comparación entre los tratamientos agronómicos evaluados de adición de enmiendas orgánicas y fertilización convencional.

Indicador físico	Tratamiento de adición de enmiendas orgánicas	Tratamiento de fertilización convencional
Conductividad hidráulica (K) (cm/h)	16,39 (\pm 6,49) A	8,36 (\pm 3,83) B

Comparación entre tratamientos mediante la prueba estadística Mann-Whitney con un valor $p < 0,05$. Promedios (\pm desviación estándar). Letras iguales entre filas de cada indicador significa que no se presentan diferencias estadísticas significativa entre tratamientos. Letras diferentes si se presentan diferencias estadísticas significativas.

Como se observa en la Tabla 4, la conductividad hidráulica (K) fue significativamente diferente entre los tratamientos, por lo que el valor K obtenido para el tratamiento con adición de enmiendas orgánicas fue 49% superior que el valor K en la fertilización convencional.

Empleando la clasificación de la K de Villón-Bejar (2006), se puede catalogar el valor K obtenido para el lote con adición de enmiendas orgánicas como rápido (12-18 cm/h), mientras que el lote de fertilización convencional corresponde a moderadamente rápido (6-12 cm/h).

Varios autores (Lepsch et al., 2019; Obi y Ebo, 1995) encontraron que, mediante la aplicación de enmiendas orgánicas, se favorece en la estabilidad de agregados del suelo y mejora la porosidad y capacidad de retención de agua, por lo que favorece la infiltración y por lo tanto la conductividad hidráulica. En adición, se han observado mejoras en la conductividad hidráulica en sistemas agrícolas al aplicarse compost en forma de lodo con una dosificación de hasta 37,5 ton/ha (Cuevas et al., 2006). No obstante, las dosificaciones mayores de hasta 80 ton/ha han sido contraproducentes debido a que se crea un sello superficial en el suelo, se dificulta el movimiento vertical del agua a través de la matriz del suelo y promueve la degradación del suelo debido a la escorrentía (Cuevas et al., 2006).

5.1.2. Indicadores químicos

Los resultados del análisis interno entre tratamiento para los parámetros químicos se presentan en la Tabla 5. Para este caso se podrán utilizar para comparar entre manejos corresponden a potasio, nitrógeno, zinc, hierro y fósforo. Los demás parámetros de analizarán individualmente por tratamiento más adelante.

Tabla 5. Valores p obtenidos en los indicadores químicos de calidad de la prueba estadística no paramétrica Kruskal-Wallis para las parcelas experimentales de cada lote de estudio.

Indicador químico	Tratamiento de adición de enmiendas orgánicas	Tratamiento de fertilización convencional
Calcio	0,0230	0,4320
Magnesio	0,0070	0,0650
Potasio	0,3480	0,0840
Fósforo*	0,0360*	0,6620
Nitrógeno (%)	0,6000	0,6660
Zinc	0,1431	0,6116
Cobre	0,0058	0,0762
Hierro	0,9068	0,1428
Manganeso	0,0140	0,2802
Azufre	0,0124	0,2184
pH	0,0249	0,2410
Carbono orgánico (Mg/ha)	0,0130	0,0270

Valor $p < 0,05$ corresponde a que se observaron diferencias estadísticas significativas entre las parcelas experimentales de un mismo lote.

*En el caso del fósforo, mediante el análisis de Kruskal-Wallis se determinó que sí existen diferencias significativas entre las parcelas con adición de enmiendas, por lo que se procedió a realizar el análisis de comparación múltiple (Test de Tukey). Empleando el análisis de comparación múltiple, se determinó que no existen diferencias estadísticas significativas entre las parcelas bajo este manejo agronómico.

En la Tabla 6 se presentan los valores obtenidos para los indicadores químicos evaluados bajo los tratamientos agronómicos de adición de enmiendas orgánicas y fertilización convencional.

Tabla 6. Indicadores químicos promedio obtenidos para la comparación entre los tratamientos agronómicos evaluados de adición de enmiendas orgánicas y fertilización convencional.

Indicador químico	Tratamiento de adición de enmiendas orgánicas	Tratamiento de fertilización convencional
Potasio (cmol(+)/L)	0,76 ($\pm 0,15$) A	0,44 ($\pm 0,11$) B
Nitrógeno (%)	0,19 ($\pm 0,01$) A	0,16 ($\pm 0,01$) B
Zinc (mg/L)	4,09 ($\pm 2,09$) A	2,18 ($\pm 0,19$) A
Hierro (mg/L)	325,07 ($\pm 2,72$) A	274,87 ($\pm 14,65$) B
Fósforo (mg/L)	21,80 ($\pm 9,01$) A	9,87 ($\pm 2,27$) B

Comparación entre tratamientos mediante la prueba estadística Mann-Whitney con un valor $p < 0,05$. Promedios (\pm desviación estándar). Letras iguales entre filas de cada indicador significa que no se presentan diferencias estadísticas significativa entre tratamientos. Letras diferentes si se presentan diferencias estadísticas significativas.

En la Tabla 6 se observa que los parámetros de potasio, nitrógeno, hierro y fósforo presentaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos agronómicos evaluados, registrando valores mayores en el tratamiento de adición de enmiendas orgánicas.

Con respecto a los niveles en el suelo de estos parámetros, se puede mencionar que el potasio, utilizando como referencia el rango de concentración en suelos inceptisoles de Costa Rica mediante el método Melich-3 por Cabalceta y Molina (2006), ambos tratamientos se encuentran en una condición suficiente, ya que van de 0,20 - 0,80 cmol(+)/L. Se observó una concentración de potasio 43% mayor en el tratamiento de adición de enmiendas orgánicas en comparación al tratamiento de fertilización convencional.

Con respecto al nitrógeno, los valores de concentración obtenidos en los dos tratamientos se catalogan según Goh (2004) como altos para el cultivo de palma aceitera, ya que suelen mantenerse en el rango de 0,15 – 0,25 % N. Se observó una concentración de nitrógeno 19% mayor en el tratamiento de adición de enmiendas orgánicas en comparación al tratamiento de fertilización convencional.

En el caso del zinc, no se presentaron diferencias estadísticamente significativas como se observa en la Tabla 6 y las concentraciones obtenidas para ambos tratamientos agronómicos pueden ser catalogadas como una condición suficiente para suelos inceptisoles (Cabalceta y Molina, 2006), ya que se obtuvieron valores que se encuentran en el rango de 1,7 a 5,0 mg/L.

Con respecto al hierro, las concentraciones encontradas en los suelos evaluados son consideradas altas por Méndez y Bertsch-Hernández (2012) ($Fe > 100$ mg/L), empleando el método Olsen modificado, por lo que puede ser utilizado como dato de referencia. Se observó una concentración de hierro 15% mayor en el tratamiento de adición de enmiendas orgánicas en comparación al tratamiento de fertilización convencional.

En el caso del fósforo, las concentraciones encontradas en las parcelas del lote con adición de enmiendas orgánicas son catalogados para suelos inceptisoles por Cabalceta y Molina (2006) como altas (>18 mg/L), mientras que en el caso del lote de fertilización convencional son catalogas como suficientes (6-18 mg/L). Se observó una concentración de fósforo 55% mayor en el tratamiento de adición de enmiendas orgánicas en comparación al tratamiento de fertilización convencional.

Los resultados anteriores indican que la adición de enmiendas orgánicas en el cultivo ha tenido un efecto positivo sobre la condición de calidad química del suelo, propiamente en los parámetros de potasio, nitrógeno, hierro y fósforo. Esto puede atribuirse a que el uso de fibras y lodos son considerados una excelente opción nutricional para mejorar la calidad de los suelos, ya que son ricos en micro y macronutrientes (Cortés et al., 2006; Madrigal-Valverde & Garbanzo-León, 2018). Además, la adición de materia orgánica puede favorecer el ciclaje de nutrientes en el suelo, por lo que la disponibilidad de nutrientes en maneras asimilables por las plantas suele ser mayor.

Se ha observado que el uso de fibras composteadas en plántulas de palma, trae consigo una serie de beneficios, como los son el incremento en la absorción de nutrientes, promueve el crecimiento vegetal y radical, y mejora en las condiciones químicas del suelo (principalmente potasio, hierro, fósforo y zinc) (Madrigal-Valverde y Garbanzo-León, 2018). De manera similar ocurre con el uso de lodos, debido a que un estudio realizado en palma de aceite en vivero (Cortés et al., 2006), indica que los lodos secos corresponden a una alternativa complementaria a la fertilización convencional, ya que estos aportan al suelo altos contenidos de nutrientes (principalmente fósforo, potasio y nitrógeno) y promueven un mejor desarrollo de la planta.

5.1.3. Indicadores microbiológicos

Los resultados del análisis interno entre tratamiento para los parámetros microbiológicos se presentan en la Tabla 7. En este caso se podrán utilizar los parámetros de biomasa microbiana y el recuento de fijadores de nitrógeno para la comparación entre tratamientos. Los demás parámetros de analizarán individualmente por tratamiento más adelante.

Tabla 7. Valores p obtenidos en los indicadores microbiológicos de calidad de la prueba estadística no paramétrica Kruskal-Wallis para las parcelas experimentales de cada lote de estudio.

Indicador microbiológico	Tratamiento de adición de enmiendas orgánicas	Tratamiento de fertilización convencional
Respiración microbiana	0,035	0,049
Biomasa microbiana	0,085	0,330
Recuento de fijadores N2	0,264	0,114
Recuento de hongos	0,953	0,043

Valor $p < 0,05$ corresponde a que se observaron diferencias estadísticas significativas entre las parcelas experimentales de un mismo lote.

En la Tabla 8 se presentan los valores obtenidos de la comparación entre tratamientos para los indicadores de calidad microbiológicos.

Tabla 8. Indicadores microbiológicos promedio obtenidos para la comparación entre los tratamientos agronómicos evaluados de adición de enmiendas orgánicas y fertilización convencional.

Indicador microbiológico	Tratamiento de adición de enmiendas orgánicas	Tratamiento de fertilización convencional
Biomasa microbiana (mg C/kg)	196,60 ($\pm 18,86$) A	151,40 ($\pm 14,86$) B
Fijadores N2 (UFC/g)	$8,29 \times 10^6$ ($\pm 4,30 \times 10^6$) A	$1,61 \times 10^7$ ($\pm 1,67 \times 10^7$) A

Comparación entre tratamientos mediante la prueba estadística Mann-Whitney con un valor $p < 0,05$. Promedios (\pm desviación estándar). Letras iguales entre filas de cada indicador significa que no se presentan diferencias estadísticas significativa entre tratamientos. Letras diferentes si se presentan diferencias estadísticas significativas.

Como se muestra en Tabla 8, en el caso de la biomasa microbiana esta fue 23% superior en el tratamiento con adición de enmiendas con respecto al tratamiento de fertilización convencional.

Los resultados de biomasa microbiana presentaron una tendencia similar a los reportados en el estudio realizado por E. Castillo (2015), donde para fertilización convencional se obtuvieron valores entre 146,92 y 174,99 mg C/kg suelo. El autor realizó el estudio en plantaciones de palma aceitera en edad joven ubicadas en la región de San Martín, Perú.

Junto a esto, la biomasa microbiana mediante la aplicación de enmiendas orgánicas en el estudio realizado por Roperó Portillo (2020), se encontró un aumento en la biomasa microbiana entre el suelo con aplicación de enmiendas y sin aplicación, además, este parámetro aumenta a medida que aumenta la dosis de aplicación de la enmienda.

Por otro lado, la elevada composición de materia orgánica en el suelo puede no estar relacionada al bienestar microbiológico. Según Chavarría et al. (2012), una baja presencia de hongos y una alta respiración microbiológica, junto con la alta concentración de materia orgánica, puede ser un indicador de que esta última no está siendo degradada adecuadamente, provocando su acumulación en el suelo.

5.2. Análisis de los parámetros que mostraron diferencias significativas entre las repeticiones de un mismo tratamiento.

Este análisis corresponde al análisis de los diferentes parámetros evaluados que presentaron diferencias significativas entre las tres parcelas establecidas en mismo tratamiento, por lo no

podieron ser utilizados para comparar entre manejo con adición de enmiendas y convencional. Estos resultados lo que indican es una alta variabilidad interna.

Se podría atribuir esta alta variabilidad interna en que en este tipo de plantaciones la distribución de los sustratos sobre el suelo no es uniforme, influenciando los resultados de los diferentes parámetros físicos, químicos y microbiológicos evaluados. Podemos citar tres puntos principales que apoyan este argumento:

1. Existen diferentes tipos de vegetación que crece bajo la palma, con el fin de mejorar la biodiversidad del sitio y proteger al suelo de la erosión. Algunas de las plantas utilizadas pueden ser fijadoras de nitrógeno, aportan materia orgánica al suelo y evitan áreas de suelo desnudo. El crecimiento de esta vegetación no es uniforme en las parcelas.
2. Durante las cosechas se realizan cortes de hojas de palma para retirar los racimos, las hojas se colocan en montículos en diferentes puntos en los lotes.
3. La aplicación de los insumos es desuniforme. En el caso de las enmiendas, estas son colocadas con alto contenido de humedad por una pala de una retroexcavadora en lugares cercanos a los caminos donde puede transitar el equipo, por lo que no se distribuye en todo el terreno. En el caso de los nutrientes minerales la aplicación se realiza de manera manual y mecánica, utilizando voleadora. La densidad y distribución de plantas imposibilita el ingreso de maquinaria o equipos a diferentes puntos dentro de los lotes, lo que hace que la aplicación de insumos sea desigual.

5.2.1. Indicadores físicos

Los resultados obtenidos del análisis entre repeticiones (parcelas) de los indicadores de calidad físicos para cada tratamiento, junto con sus promedios, desviaciones estándar y coeficientes de variación, se muestran a continuación (Tabla 9).

Tabla 9. Valores promedio de indicadores físicos evaluados para cada tratamiento con adición de enmiendas orgánicas y fertilización convencional.

Indicador físico	Parcela (repetición)	Tratamiento de adición de enmiendas orgánicas	Tratamiento de fertilización convencional
Densidad aparente (g/cm ³)	1	1,32 (\pm 0,08) A	1,30 (\pm 0,12) A
	2	1,22 (\pm 0,08) A B	1,20 (\pm 0,07) A
	3	1,14 (\pm 0,04) B	1,22 (\pm 0,06) A
Porosidad	1	0,50 (\pm 0,03) A	0,51 (\pm 0,04) A
	2	0,54 (\pm 0,03) AB	0,55 (\pm 0,03) A
	3	0,57 (\pm 0,02) B	0,54 (\pm 0,02) A
Infiltración (mm/h)	1	10,59 (\pm 2,46) A	14,98 (\pm 5,84) A B
	2	11,01 (\pm 3,15) A	18,80 (\pm 5,75) A
	3	15,34 (\pm 5,81) A	8,45 (\pm 4,07) B
Resistencia a la penetración	1	27,24 (\pm 1,91) A	24,97 (\pm 2,86) A
	2	26,37 (\pm 1,55) B	25,85 (\pm 1,86) B
	3	25,50 (\pm 1,56) C	25,49 (\pm 1,49) A B
Materia orgánica (%)	1	8,33 (\pm 0,37) A B	7,11 (\pm 0,30) A
	2	7,50 (\pm 0,43) A	7,07 (\pm 0,26) A
	3	8,23 (\pm 0,59) B	6,12 (\pm 0,57) A

Comparación múltiple empleando la prueba Tukey con un $p < 0,05$. Promedios (\pm desviación estándar). Letras iguales entre filas de cada indicador significa que no se presentan diferencias estadísticas significativa entre parcelas. Letras diferentes si se presentan diferencias estadísticas significativas.

Tal como se observa en la Tabla 9, los valores de densidad aparente obtenidos para las parcelas en estudio del lote con adición de enmiendas, se presentaron diferencias significativas, mientras que, en el lote de fertilización convencional, no se presentaron diferencias significativas. Debido a esto, no es posible comparar las condiciones de densidad aparente encontradas en el suelo bajo los manejos agronómicos. Sin embargo, estas diferencias encontradas a lo interno del tratamiento de adición de enmiendas pueden explicarse a la desuniforme distribución de los lodos y fibras que se realiza en estas parcelas, que, como se mencionó anteriormente, son depositadas en cúmulos sin que exista una buena distribución que permita una capa uniforme por el suelo, como sería el caso ideal de cualquier aplicación. Esta situación lleva a características muy heterogéneas en diferentes puntos de esas mismas parcelas.

Según la literatura, la densidad aparente encontrada en suelos cultivados con palma aceitera en Venezuela ronda los 1,35 g/cm³ en suelos vertisoles y 1,54 g/cm³ en suelos ultisoles (Barrios-Maestre y Florentino-De-Andreu, 2009). Aunque estos valores no son comparables con los

encontrados en el estudio, por la diferencia del orden de suelos inceptisoles, se observa que los resultados encontrados en este trabajo son ligeramente menores en comparación a los vertisoles y considerablemente menores en comparación a los ultisoles. En adición, Alvarado y Forsythe (2005) en su estudio en suelos de Costa Rica, determinaron que los valores de densidad aparente para el orden inceptisol en el rango de 0-20 cm de profundidad va de 0,67-1,71 g/cm³, con un promedio de 1,21 g/cm³. Los datos de densidad aparente obtenidos en nuestro estudio presentan un comportamiento que ronda el valor promedio reportado por Alvarado y Forsythe (2005), por lo que las condiciones del suelo se encuentran dentro de los rangos normales.

En el estudio realizado en palma de aceite en Medellín, Colombia por Gutierrez-Palacio, (2017), se observó que la densidad aparente del suelo es mayor entre mayor sea la edad del cultivo debido a las prácticas y manejo agrícola que se realicen. Además, se observa que entre mayor sea la profundidad del muestreo, la magnitud de densidad aparente tiende a ser mayor, por lo que es posible analizar la calidad de suelo frente a problemas de compactación, afectación en la elongación radicular de la palma y el nivel de incidencia frente a enfermedades como la pudrición de cogollo. Gutierrez-Palacio (2017) reporta valores de densidad aparente de 1,54 g/cm³ en las interlíneas del cultivo de palma con 15-17 años en muestreos de 0-30 cm de profundidad, por lo que los datos de nuestro estudio son significativamente menores.

En cuanto a la porosidad total, Chacón-Gómez (2022) indica que, es una propiedad intrínseca de la densidad aparente del suelo, por lo que el comportamiento es inversamente proporcional, en donde a menor densidad aparente, mayor porosidad y viceversa. A nivel estadístico, presentó el mismo comportamiento que la densidad aparente, debido a que se encontraron diferencias significativas entre las parcelas del lote con adición de enmiendas orgánicas, mientras que, en las parcelas del lote de fertilización convencional, no se encontraron diferencias significativas. Las condiciones normales de porosidad para suelos agrícolas corresponden a 0,50, por lo que partir de los datos obtenidos se observa una condición normal de porosidad en las parcelas analizadas debido a que rondan este valor de referencia (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2022).

Con respecto a las pruebas de infiltración en campo, no se encontraron diferencias significativas en las parcelas estudiadas del lote con adición de enmiendas orgánicas, mientras que en el caso del lote con el tratamiento de fertilización convencional sí se encontraron diferencias significativas

entre las parcelas. Al existir estas diferencias entre las parcelas de los lotes en estudio, no es posible una comparación entre los manejos agronómicos. Además, no es posible asegurar que las diferencias en las capacidades de infiltración en campo se deban a la aplicación de enmiendas orgánicas, ya que como explica Barrios-Maestre y Florentino-De-Andreu (2009), la variabilidad espacial de las propiedades físicas depende también de factores litológicos del suelo y de las prácticas de manejo que se han tenido a lo largo del tiempo.

Con respecto a la resistencia a la penetración, se encontraron diferencias estadísticamente significativas para las parcelas de ambos tratamientos, por lo que este comportamiento puede estar directamente relacionado a la variabilidad espacial y prácticas de manejo (Barrios-Maestre & Florentino-De-Andreu, 2009). A partir de la literatura, el valor mínimo de resistencia del suelo a la penetración que indica un problema serio de compactación corresponde a $30,58 \text{ kgf/cm}^2$ (3,00 MPa), por lo que la penetración y elongación de las raíces se dificulta y afecta en gran medida el desarrollo del cultivo (Gutierrez-Palacio, 2017; Ortiz y Hernanz, 1989; Rowse y Goodman, 1981). Utilizando como referencia este valor mínimo de resistencia a la penetración, nuestros resultados indican que el suelo en las parcelas de estudio en ambos tratamientos no alcanza este valor crítico.

Con respecto al contenido de materia orgánica en el suelo, conlleva una serie de beneficios como la disponibilidad de nutrientes, crecimiento radicular y desarrollo de microorganismos, lo cual se relaciona con el crecimiento en la productividad del cultivo (Castillo, 2021). Es allí donde radica la importancia de mantener un adecuado porcentaje de materia orgánica disponible en el suelo.

En la tabla 9 se observa que el contenido de materia orgánica en el tratamiento de fertilización convencional no muestra diferencias significativas, sin embargo, se observa una heterogeneidad en las parcelas del tratamiento de enmienda orgánica, directamente relacionado a la mala distribución de estas enmiendas en el área de los lotes donde se aplican. Según Molina y Meléndez (2002), el contenido de materia orgánica óptimo en suelos agrícolas va de 5-10%, por lo tanto, nuestros resultados para ambos tratamientos en estudio se encuentran en el rango óptimo. Por otro lado, Owen-Barletto (1995) reportó para plantaciones de palma valores de materia orgánica hasta de 6,73%, nuestros resultados en el tratamiento de adición de enmiendas son ligeramente mayores a este valor, y es muy similar al comportamiento de los valores en el tratamiento con manejo convencional.

Adicionalmente, los datos obtenidos para ambos tratamientos se pueden clasificar en un rango intermedio según la clasificación estudiada por Rozieta et al. (2015), ya que se encuentran entre el rango de 4-10% de contenido de materia orgánica publicado por estos autores. Esto indica que los suelos del lote con adición de enmiendas orgánicas y el lote de fertilización convencional poseen un contenido intermedio de materia orgánica disponible en los primeros 20 cm de profundidad.

5.2.2. Indicadores químicos

Los resultados obtenidos del análisis interno de los indicadores de calidad químicos de las parcelas experimentales, junto con sus promedios, desviaciones estándar y coeficientes de variación, se muestran a continuación (Tabla 10).

Tabla 10. Valores promedio de indicadores químicos evaluados para los tratamientos con adición de enmiendas orgánicas y fertilización convencional.

Indicador químico	Parcela (repetición)	Tratamiento de adición de enmiendas orgánicas	Tratamiento de fertilización convencional
Calcio (cmol(+)/L)	1	19,94 ($\pm 3,19$) A	20,85 ($\pm 2,62$) A
	2	24,49 ($\pm 1,51$) B	22,36 ($\pm 1,25$) A
	3	21,55 ($\pm 1,43$) A B	21,29 ($\pm 2,19$) A
Magnesio (cmol(+)/L)	1	5,98 ($\pm 0,6$) A	6,75 ($\pm 0,86$) A
	2	8,80 ($\pm 0,77$) B	6,18 ($\pm 0,4$) A
	3	8,12 ($\pm 0,45$) AB	5,36 ($\pm 0,75$) A
Cobre (mg/L)	1	40,00 ($\pm 13,91$) A	18,80 ($\pm 7,26$) A
	2	27,40 ($\pm 6,5$) A B	24,00 ($\pm 9,14$) A
	3	12,20 ($\pm 1,79$) B	39,60 ($\pm 15,44$) A
Manganeso (mg/L)	1	40,40 ($\pm 12,6$) A	94,00 ($\pm 21,44$) A
	2	59,40 ($\pm 9,76$) A B	110,00 ($\pm 8,92$) A
	3	69,80 ($\pm 12,93$) B	99,00 ($\pm 23,24$) A
Azufre (mg/L)	1	41,80 ($\pm 4,82$) A	43,40 ($\pm 3,36$) A
	2	50,80 ($\pm 2,28$) B	46,60 ($\pm 2,51$) A
	3	50,60 ($\pm 3,05$) B	44,80 ($\pm 2,39$) A
pH	1	5,44 ($\pm 0,18$) A	5,56 ($\pm 0,23$) A
	2	5,96 ($\pm 0,27$) B	5,62 ($\pm 0,23$) A
	3	5,82 ($\pm 0,19$) B	5,82 ($\pm 0,23$) A
Carbono Orgánico (Mg/ha)	1	109,85 ($\pm 10,33$) A	92,26 ($\pm 9,62$) A
	2	91,45 ($\pm 10,16$) B C	85,05 ($\pm 8,06$) A C
	3	93,46 ($\pm 5,76$) C	74,36 ($\pm 6,60$) B C

Comparación múltiple empleando la prueba Tukey con un $p < 0,05$. Promedios (\pm desviación estándar). Letras iguales entre filas de cada indicador significa que no se presentan diferencias estadísticas significativa entre parcelas. Letras diferentes si se presentan diferencias estadísticas significativas.

Con respecto a los indicadores químicos de calidad (calcio, magnesio, cobre, manganeso, azufre y pH) se presentaron únicamente diferencias significativas entre las parcelas del lote de adición de enmiendas orgánicas (Tabla 10). Debido a lo anterior, no es posible realizar una comparación entre los tratamientos.

Según Cabalceta y Molina (2006), las concentraciones de $\text{Ca} > 18 \text{ cmol}(+)/\text{L}$ para suelos inceptisoles, se categorizan como condición alta y los valores promedio obtenidos se encuentran en este rango de medición (Tabla 10).

En el caso del magnesio, las concentraciones en suelos inceptisoles $> 5 \text{ cmol}(+)/\text{L}$ son catalogadas como una condición alta (Cabalceta y Molina, 2006) y es posible observar que para las parcelas de ambos lotes se obtuvieron valores en este rango de concentración (Tabla 10).

Con respecto al cobre, las concentraciones encontradas en las parcelas de ambos lotes son catalogadas para suelos inceptisoles como altas ($\text{Cu} > 5 \text{ mg/L}$) (Cabalceta y Molina, 2006).

Según Cabalceta y Molina (2006), las concentraciones de $\text{Mn} > 10 \text{ mg/L}$ empleando el análisis Mehlich 3 son consideradas altas, mientras que Méndez y Bertsch-Hernández (2012) mediante Olsen Modificado, catalogan las concentraciones de $\text{Mn} > 20 \text{ mg/L}$ como altas. Además, indican que concentraciones de $\text{Mn} > 100 \text{ mg/L}$ son catalogadas como anormales y pueden llegar a ser problemáticas para la fertilidad del suelo (Méndez y Bertsch-Hernández, 2012).

Con respecto a las concentraciones de azufre observadas para el lote con adición de enmiendas orgánicas, estas pueden catalogarse como suficiente ($32\text{-}50 \text{ mg/L S}$) y altas ($\text{S} > 50 \text{ mg/L}$), mientras que para el lote de fertilización convencional son catalogadas como suficientes (Cabalceta y Molina, 2006).

En el caso del pH, los valores obtenidos para ambos lotes se encuentran dentro de los niveles de pH adecuados de 4-6 y cercanos al rango óptimo de 5,5 (Sergieieva, 2022; Vásquez-Granda, 2001). Por otra parte, Cuenca-Tinoco et al. (2020) en estudios realizados en frijol, observó que la aplicación de enmiendas en situaciones de acidez en suelos andisoles, presentaron mayor efectividad para estabilizar el pH y aumentar el crecimiento y rendimiento de las plantas.

En cuanto al carbono orgánico determinado a partir de la materia orgánica, según Leblanc et al. (2006), el carbono en el suelo de la región húmeda costarricense en plantaciones de palma aceitera

alcanza los 73,34 Mg/ha, este valor de referencia fue determinado para los primeros 30 cm de profundidad, para el orden de suelo Andisol y bajo la misma densidad de siembra de los lotes de este estudio. Nuestros resultados de carbono orgánico para suelos inceptisoles a una profundidad de 0-20 cm tienen la tendencia a ser más elevados, en ambos tratamientos.

En cuanto a la variabilidad encontrada en los indicadores químicos en el tratamiento de enmiendas orgánicas, se atribuye de igual forma al componente de la distribución de los lodos y fibras a lo ancho de los lotes donde se aplican estos.

5.2.3. Indicadores microbiológicos

Los resultados obtenidos del análisis interno de los indicadores de calidad microbiológicos de las parcelas experimentales, junto con sus promedios, desviaciones estándar y coeficientes de variación, se muestran a continuación (Tabla 11).

Tabla 11. Valores promedio de indicadores microbiológicos evaluados para los tratamientos con adición de enmiendas orgánicas y fertilización convencional.

Indicador microbiológico	Parcela (repetición)	Tratamiento de adición de enmiendas orgánicas	Tratamiento de fertilización convencional
Respiración (mg C-CO ₂ /kg día)	1	37,60 (±21,96) A	47,20 (±8,14) A
	2	77,80 (±42,96) A B	59,20 (±34,82) A B
	3	84,80 (±20,50) B	87,60 (±14,72) B
Recuento de Hongos (UFC/g)	1	6,38E+03 (±8,38 x10 ³) A	1,95E+04 (±1,05 x10 ⁴) A
	2	6,90E+03 (±8,48 x10 ³) A	4,48E+03 (±1,58 x10 ³) B
	3	9,80E+03 (±9,80 x10 ³) A	1,11E+04 (±1,51 x10 ⁴) A B

Comparación múltiple empleando la prueba Tukey con un $p < 0,05$. Promedios (± desviación estándar). Letras iguales entre filas de cada indicador significa que no se presentan diferencias estadísticas significativa entre parcelas. Letras diferentes si se presentan diferencias estadísticas significativas.

Para ambos tratamientos estudiados, la respiración del suelo se encuentra por encima de los resultados reportados por Batubara et al. (2019), donde para suelos en el trópico de plantaciones de palma adulta se presenta una respiración de 33 (±0,8) mg C-CO₂/kg día a una profundidad de estudio de 0-20 cm. González-Pedraza et al. (2011), también reporta resultados por debajo de los obtenidos en este estudio, donde en plantaciones con suelos arcillosos, se presentaron valores de entre 12,80 y 22,80 mg C-CO₂/kg día aproximadamente.

Por otro lado, Chukwu et al. (2020) indica que la actividad microbiana aumenta con la edad de la palma, incluso hasta los 39 años, momento en el que comienza a disminuir. Debido a esto se puede esperar que en plantaciones jóvenes se presente una menor actividad microbiana, requiriendo una mayor y más efectiva incorporación de materia orgánica al suelo para mejorar el desarrollo de la microbiota. Además, la respiración del suelo se encuentra relacionada con el cultivo siendo indicador de la intensidad del uso del suelo presentando diferencias según sus distintos usos (Di Ciocco et al., 2014), esto implica que puede ser utilizado como indicador de la necesidad de recuperación de los suelos de los diferentes lotes de la empresa.

Por otro lado, en lo que respecta al recuento de hongos, tomando en cuenta los valores reportados por Pupin et al. (2009) en general para suelos, estos muestran que el recuento de hongos es entre $3,0 \times 10^5$ UFC/g y $8,0 \times 10^5$ UFC/g aproximadamente. Nuestros resultados para ambos tratamientos se encuentran por debajo de estos valores. Nuestros resultados también se encuentran por debajo de los reportados por Pane et al. (2022), donde en plantaciones de palma adulta, se encontró un recuento de hongos totales de $7,2 \times 10^4$ UFC/g a una profundidad de 0-20 cm. También, en el recuento de hongos, un comportamiento similar fue obtenido por (Marín et al. (2017), donde en suelos con fertilización orgánica y convencional en la zona de Zarcero, no presentaron diferencias en UFC.

5.3. Análisis de productividad entre tratamientos

Los resultados obtenidos de diferentes parámetros de productividad a partir de los registros de la empresa Palma Tica S.A, para ambos tratamientos del periodo 2014-2021 se encuentran a continuación.

Tabla 12. Valores promedio de diferentes parámetros de productividad analizados mediante la prueba t de student para los manejos agronómicos estudiados del periodo 2014-2021.

Parámetro	Tratamiento de adición de enmiendas orgánicas	Tratamiento de fertilización convencional
Productividad (ton/ha)	24,23 ($\pm 2,95$) A	23,62 ($\pm 3,02$) A
Peso promedio del racimo (kg)	21,04 ($\pm 1,99$) A	19,29 ($\pm 1,70$) A
Densidad racimos por ha	1162,80 ($\pm 190,07$) A	1237,30 ($\pm 214,05$) A

Comparación múltiple empleando la prueba t student con un $p < 0,05$. Letras iguales entre filas de cada indicador significa que no se presentan diferencias estadísticas significativa entre tratamientos.

Como se puede observar en la Tabla 12, no se presentaron diferencias significativas en los parámetros de productividad, peso promedio del racimo y densidad de racimos por ha en ambos tratamientos.

Desde el punto de vista de la agricultura climáticamente inteligente, el hecho de que no se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos es positivo. Esto indica que las condiciones del suelo se mantuvieron sin diferencias con la aplicación de enmiendas orgánicas, lo que incurre en una disminución de la dependencia de fertilizantes comerciales, aplicación de químicos al suelo y revalorización de los residuos producidos en la extracción de aceite, lo cual también se puede ver reflejado en el aspecto económico, ya que se reducen los costos asociados a la compra de estos insumos.

En cuanto a los beneficios de la aplicación de enmiendas orgánicas sobre la productividad, se han encontrado estudios en otros cultivos como el café, donde se han encontrado mejoría a partir de aplicaciones de enmiendas de origen vegetal y animal (Velez & Verona, 2018). Otro de los beneficios de la aplicación de enmiendas orgánicas en la productividad es que, a diferencia de la fertilización convencional, la cual aporta solamente sobre las propiedades químicas, también tiene un impacto positivo sobre las propiedades físicas y biológicas del suelo, las cuales promueven la conservación de suelos y una mejora en el desarrollo de los cultivos.

5.4. Índice de calidad de suelo aditivo (ICSA)

A partir del análisis estadístico se contemplaron únicamente los indicadores que no presentaron diferencias significativas entre las parcelas de un mismo lote, permitiendo la comparación de los tratamientos de adición de enmiendas orgánicas versus fertilización convencional. La determinación de la calidad del suelo mediante el ICSA se realizó a partir de la sumatoria de los ICS, bajo el criterio de que, a mayor valor del indicador, mejor es la calidad del suelo del sistema en estudio. Para esto, se tomaron en cuenta el indicador físico de conductividad hidráulica (Tabla 4), los indicadores químicos K, N, Zn, Fe, P (Tabla 6), y los indicadores microbiológicos biomasa microbiana y el recuento de fijadores de nitrógeno (Tabla 8).

Se realizó un análisis estadístico utilizando los valores de ICSA obtenidos de las parcelas (tres réplicas en campo) de cada tratamiento, con el objetivo de determinar si existían diferencias significativas entre los tratamientos estudiado.

En la Tabla 13 se muestran los valores de ICSA obtenidos para cada tratamiento con sus respectivas desviaciones estándar. Se puede observar que no existen diferencias significativas para los indicadores físicos, químicos y microbiológicos, así como para el valor total de cada tratamiento, por lo que es un aspecto positivo debido a que con el uso de enmiendas orgánicas se están observando condiciones similares de calidad en comparación a la fertilización convencional.

Tabla 13. Índice de calidad del suelo aditivo (ICSA) para los indicadores estudiados.

Indicadores	Tratamiento de adición de enmiendas orgánicas	Tratamiento de fertilización convencional
Físicos	0,37 ($\pm 0,11$) A	0,25 ($\pm 0,09$) A
Químicos	3,56 ($\pm 0,32$) A	3,86 ($\pm 0,45$) A
Microbiológicos	1,37 ($\pm 0,10$) A	1,29 ($\pm 0,23$) A
Total	5,29 ($\pm 0,33$) A	5,40 ($\pm 0,34$) A

Comparación múltiple empleando la prueba t student con un valor $p < 0,05$. Promedios (\pm desviación estándar). Letras iguales entre filas de cada indicador significa que no se presentan diferencias estadísticas significativa entre tratamientos.

Nuestros resultados muestran que los mejores índices de calidad de suelo lo presentan los parámetros químicos, seguido para valores más bajos en calidad microbiológica y aún más bajo en calidad física de los suelos. Un aspecto para considerar que influye en la calidad física corresponde a la edad del cultivo, por lo que entre más adulta sea la plantación puede llegar a generarse problemas de compactación del suelo ligadas al manejo y prácticas agrícolas. Inclusive, la caída de la fruta durante la cosecha genera compactación en la rodaja alrededor de la palma (Gutierrez-Palacio, 2017; Munévar-Martínez, 1998).

6. RECOMENDACIONES PARA OPTIMIZAR EL MANEJO DE SUELOS Y PRODUCTIVIDAD

1. Analizar la composición química de los lodos (base seca) aplicados en campo como enmiendas orgánicas para conocer el aporte nutricional de los lodos, con el objetivo de adecuar con mayor precisión las aplicaciones de fertilizantes convencionales que se realicen. Es posible que se genere un ahorro económico y de insumos agrícolas (Avendaño-Cardenas & Martinez-Gonzalez, 2015).
2. Para mejorar la física de los lodos es necesario reducir su contenido de humedad, con el fin de optimizar la aplicación y distribución en campo. Una opción es disminuir la profundidad de llenado de los lechos de secado actuales, con el objetivo de mejorar el proceso de secado.
3. Otra opción para mejorar la física de los lodos es trasladarlos de los lechos de secado a la zona de compostaje (actualmente depósito de cenizas) y compostear los lodos junto con las cenizas. El compostaje busca estabilizar los lodos para lograr una degradación controlada e inactivar organismos patógenos, así como mejorar la composición física (Amador-Díaz et al., 2015).
4. El compost de lodos junto con las cenizas debe de voltearse periódicamente para disminuir el contenido de humedad de manera uniforme y así, mejorar su calidad física y evitar el apelotonamiento.
5. Para una distribución homogénea de las enmiendas en campo utilizar una voleadora y evitar la aplicación utilizando la paleta de la retroexcavadora, ya que agrava considerablemente el problema de compactación de los suelos.
6. Diseñar diferentes tipos de mezclas de enmiendas orgánicas y evaluar cuáles promueven un mejor desarrollo de la palma en edades diferentes del cultivo (Pérez et al., 2007; Romero-Ruiz, 2019).

7. CONCLUSIONES

1. Se presentaron diferencias significativas entre tratamiento convencional y aplicación de enmiendas orgánicas en los parámetros físicos de conductividad hidráulica, químicos de potasio, nitrógeno, hierro y fósforo, y microbiológicos biomasa microbiana, con la tendencia a ser superiores en el tratamiento con adición de enmiendas orgánicas.
2. A pesar de las diferencias encontradas entre tratamientos (convencional y adición enmiendas orgánicas) en diferentes parámetros evaluados no es posible afirmar que las diferencias se deban únicamente a la adición de enmiendas. Esto se debe a que no son distribuidas uniformemente en los lotes. Además, los factores climáticos, la formación del suelo y prácticas de manejo, también inciden sobre las condiciones de suelo encontradas.
3. No se observaron diferencias significativas en la productividad, peso promedio de racimos y densidad de racimos por hectárea entre los tratamientos analizados. Por lo que la incorporación de enmiendas podría favorecer la disminución de la dependencia de fertilizantes convencionales y la revalorización de residuos orgánicos, por lo que se promueve la economía circular en la empresa y los postulados de la agricultura climáticamente inteligente.
4. No se observaron diferencias significativas en los indicadores de calidad físicos, químicos y microbiológicos del suelo mediante el ICESA entre los tratamientos analizados. Por lo tanto, utilizando este índice de calidad no se puede determinar que uno de los tratamientos tenga mejores resultados con respecto al otro.
5. A pesar de que no se observaron diferencias significativas entre algunos indicadores, esto es un resultado positivo, ya que se presentan condiciones similares en el tratamiento con adición de enmiendas y disminución de fertilizantes. Además, esto se traduce en una disminución en la dependencia de fertilizantes sintéticos, así como en costos asociados.
6. Los resultados obtenidos podrían no ser representativos para todos los lotes bajo los mismos tratamientos, debido a la variabilidad espacial de los suelos.

8. RECOMENDACIONES GENERALES

1. Caracterizar los parámetros físicos, químicos y microbiológicos en los lodos aplicados como enmiendas orgánicas, así como analizar la presencia de metales pesados y organismos patógenos en estos insumos.
2. No aplicar los lodos empleados como enmiendas orgánicas en el cultivo sin una previa caracterización física, química y microbiológica, así como análisis de metales pesados y de microorganismos patógenos.
3. Realizar estudios sobre la aplicación y el efecto de enmiendas orgánicas sobre diferentes edades del cultivo de palma aceitera.
4. Realizar una evaluación económica de los costos asociados en la producción y aplicación de enmiendas orgánicas, así como el ahorro generado por la reducción de los fertilizantes comerciales aplicados durante el periodo de estudio (2016-2021).
5. Analizar los puntos críticos en conjunto con los actores involucrados en manejo de la producción, suelos y fertilización, con el fin de evaluar solamente los indicadores más importantes en futuras investigaciones.
6. Realizar estudios de las condiciones del suelo a partir de los indicadores físicos, químicos y microbiológicos más importantes de manera periódica, con el objetivo de registrar y analizar la calidad del suelo a lo largo del tiempo.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agrodite. (2020). *Circular economy in de Indonesian agricultural sector. Case studies from The Field for a Circular vision* (p. 54). <https://www.fao.org/agroecology/database/detail/es/c/1296038/>
- Alvarado, A., & Forsythe, W. (2005). Variación de la densidad aparente en órdenes de suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 29(1), 85–94. https://www.mag.go.cr/rev_agr/v29n01_085.pdf
- Alvarado-Batres, C., & Barahona-Palomo, M. (2017). Comparación de entre tres métodos de infiltración para calcular el balance hídrico del suelo, en la Cuenca del río Suquiapa, El Salvador. *UNED Research Journal*, 9(1), 23–33.
- Álvarez-Solís, J., Díaz-Pérez, León-Martínez, N. S., & Guillén-Velásquez, J. (2010). Enmiendas Orgánicas Y Actividad Metabólica Del Suelo En El Rendimiento De Maíz. *Terra Latinoamericana*, 28(3), 239–245.
- Amador-Díaz, A., Veliz-Lorenzo, E., & Bataller-Venta, M. (2015). Tratamiento de lodos, generalidades y aplicaciones. *Revista CENIC Ciencias Químicas*, 46, 1–10. <https://www.redalyc.org/pdf/1816/181642434003.pdf>
- Anderson, J. (1982). Measurement of CO₂ evolution rates. In *Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry* (pp. 831–871).
- Andrews, S. S., Karlen, D. L., & Mitchell, J. P. (2002). A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 90(1), 25–45. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00174-8](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00174-8)
- Avendaño-Cardenas, F., & Martinez-Gonzalez, J. (2015). *Recuperación de lodos de las lagunas de oxidación provenientes del proceso de extracción de aceite de palma, para usar como abono en cultivos de palma africana* [Universidad Nacional Abierta y A Distancia]. <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/3823/91530880.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

- Barrios-Maestre, R., & Florentino-De-Andreu, A. (2009). Variabilidad espacial de las propiedades físicas de dos suelos cultivados con palma aceitera en el estado Monagas, Venezuela. *UDO Agrícola*, 9(4), 912–924.
- Batubara, S. F., Agus, F., Rauf, A., & Elfiati, D. (2019). Soil respiration and microbial population in tropical peat under oil palm plantation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 260(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/260/1/012083>
- Benimeli, M.-F., Plasencia, A., Corbella, R. D., Guevara, D. A., Sanzano, A., Sosa, F. A., & Fernández-de-Ullivari, J. (2019). El nitrógeno del suelo. *Universidad Nacional de Tucumán*, 11.
- Bonomie, M., & Reyes, M. (2012). Estrategia ambiental en el manejo de efluentes en la extracción de aceite de palma. *Revista de Estudios Interdisciplinarios En Ciencias Sociales*, 14(3), 323–332. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1103/1103>
- Cabalçeta, G., & Molina, E. (2006). Niveles críticos de nutrimentos en suelos de Costa Rica utilizando la solución extractora MEHLICH 3. *Agronomía Costarricense*, 30(2), 31–44. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agrocost/article/view/6808/6495>
- Calderón-Medina, C. L., Bautista-Mantilla, G. P., & Rojas-González, S. (2018). Propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo, indicadores del estado de diferentes ecosistemas en una terraza alta del departamento del Meta. *Orinoquia*, 22(2), 141–157. <https://doi.org/10.22579/20112629.524>
- Cámara Nacional de Productores de Palma. (n.d.). *Canapalma: Historia*. Revisado: enero 25, 2022, en <http://www.canapalma.cr>
- Castillo, E. (2015). Distribución de nutrientes, biomasa microbiana y densidad de oligoquetos en suelos con diferentes edades de instalación de palma (*Elaeis guineensis*). En *Universidad Nacional Agraria De La Selva*. <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/1040>
- Castillo, O. (2021). Incremento en el contenido de materia orgánica del suelo con el uso de biomasa del cultivo, como estrategia para mantener altas productividades. *Palmas*, 43(1), 97–101.
- Chacón-Gómez, D.-A. (2022). *Análisis de la intervención en obras de conservación de suelo y agua y su relación con la calidad del suelo en dos fincas productoras de café en la cuenca*

alta del río Jesús María [Universidad de Costa Rica].
<https://www.ingbiosistemas.ucr.ac.cr/wp-content/uploads/2022/07/TFG-DiegoChaconGomez.pdf>

- Chaimsohn, F.-P., Villalobos, E., & Uрпи, J. M. (2007). El fertilizante orgánico incrementa la producción de raíces en pejibaye (*Bactris gasipaes* K.). *Agronomía Costarricense*, 31(2), 57–64. https://www.mag.go.cr/rev_agr/v31n02_057.pdf
- Chavarría, N., Tapia, A., Soto, G., & Virginio, E. (2012). Efecto de diferentes sistemas de manejo sobre la calidad del suelo, en fincas cafetaleras de la zona de Turrialba y Orosi. *Revista Intersedes*, 13(26), 85–105.
- Chukwu, E. D., Udoh, B. T., Okoli, N. H., & Nnabuihe, E. C. (2020). Soil Microbial Activities Influenced By Oil Palm Cultivation In A Coastal Plain Sands Area Of Akwa Ibom State, Nigeria. *International Journal of Scientific and Research Publications (IJSRP)*, 10(05), 373–379. <https://doi.org/10.29322/ijsrp.10.05.2020.p10143>
- Clare-Rhoades, P. (2011). *Los cambios en la cadena de producción de la palma aceitera en el Pacífico costarricense. Una historia económica, socioambiental y tecnocientífica: 1950-2007*. Sociedad Editora Alquimia 2000.
- Cortés, C., Cayón, D., Aguirre, V., & Chaves, B. (2006). Respuestas de palmas de vivero a la aplicación de residuos de la planta extractora. Desarrollo vegetativo y distribución de materia seca. *Palmas*, 27(3), 23-32.
- Cuenca-Tinoco, A. C., Castro-Delgado, N. I., Cargua-Chávez, J. E., Cedeño-García, G. A., & Cedeño-Zambrano, J. L. (2020). Efectividad de enmiendas sobre el crecimiento y rendimiento de fréjol común en suelo andisol ácido. *Temas Agrarios*, 25(1), 54–65. <https://doi.org/10.21897/rta.v25i1.2236>
- Cuevas, J., Seguel, O., Ellies, A., & Dörner, J. (2006). Efectos de las enmiendas orgánicas sobre las propiedades físicas del suelo con especial referencias a la adición de lodos urbanos. *Revista de La Ciencia Del Suelo y Nutrición Vegetal*, 6(2), 1–12. <https://doi.org/10.4067/s0718-27912006000200001>

- Danielson, R. E., & Sutherland, P. L. (1986). Porosity. In *Methods of soil analysis* (pp. 443–461). Soil Science Society of America, American Society of Agronomy.
- Delgado-Londoño, D. M. (2017). Aplicación de enmiendas orgánicas para la recuperación de propiedades físicas del suelo asociadas a la erosión hídrica. *Lámpsakos*, 17, 77–83. <https://doi.org/10.21501/21454086.1907>
- Di Ciocco, C. A., Sandler, R. V., Falco, L. B., & Coviella, C. E. (2014). Actividad microbiológica de un suelo sometido a distintos usos y su relación con variables físico- químicas. *Revista de La Facultad de Ciencias Agrarias*, 46(1), 73–85. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=382837657006>
- Durán, N., & Ortiz, R. (1995). Efecto de algunas propiedades físicas del suelo y la precipitación sobre la producción de la palma aceitera (*Elaeis guineensis*) en Centroamérica. *Agronomía Mesoamericana*, 6, 7–14. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agromeso/article/view/24802/25016>
- Durango, W., Uribe, L., Henríquez, C., & Mata, R. (2015). Respiración, biomasa microbiana y actividad fosfatasa del suelo en dos agroecosistemas y un bosque en Turrialba, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 39(1), 37–46. <https://doi.org/10.15517/rac.v39i1.19543>
- Eijkelkamp. (n.d.). *Penetrómetros manuales Eijkelkamp*. Revisado: Febrero 14, 2022, en <https://sp.eijkelkamp.com/productos/equipo-de-medici-n-de-campo/penetrometros-manuales-eijkelkamp.html>
- Elementar. (2022). *Elementar vario MACRO cube*. Organic Elemental Analyzers. <https://www.elementar.com/en/products/organic-elemental-analyzers/vario-macro-cube>
- Ellen Macarthur Foundation. (2017). *Economía Circular*. <https://archive.ellenmacarthurfoundation.org/es/economia-circular/concepto>
- Esquivel, E., Rubilar, R., Sandoval, S., Acuña, E., Cancino, J., Espinosa, M., & Muñoz, F. (2013). Efecto de plantaciones dendroenergéticas en el carbono a nivel de suelo, en dos suelos contrastantes de la Región de Biobío, Chile. *Revista Arvore*, 37(6), 1135–1144. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622013000600015>

- Flores-Delgadillo, L., & Alcalá-Martínez, J.-R. (2010). *Manual de procedimientos analíticos*. <https://www.geologia.unam.mx/igl/deptos/lfs/manualLFS.pdf>
- Forero Hernández, D. C., Hormaza Martínez, P. A., Moreno Caicedo, L. P., & Ruiz Romero, R. (2012). *Generalidades sobre la morfología y fenología de la palma de aceite*. Centro de Investigación en Palma de Aceite. <https://bit.ly/3EDvYuG>
- Forsythe, W. (1985). *Física de suelos: manual de laboratorio* (1 Ed.). IICA. <https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/7841/BVE19040149e.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Furtak, K., Grzadziel, J., Gałazka, A., & Niedźwiecki, J. (2019). Analysis of soil properties, bacterial community composition, and metabolic diversity in fluvisols of a floodplain area. *Sustainability*, *11*(14). <https://doi.org/10.3390/su11143929>
- Gabriels, D., Lobo, D., & Pulido, M. (2006). Métodos para determinar la conductividad hidráulica saturada y no saturada de los suelos. *Venesuelos*, *14*(1), 7–22. http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_venes/article/view/980#:~:text=En
- Galindo, T., & Romero, H. (2010). Microbiología del suelo cultivado con palma de aceite en Colombia: elementos clave para la competitividad y sostenibilidad del cultivo. *Palmas*, *31*(2), 49–60. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1478/1478>
- García, C. (2008). Enmiendas orgánicas para suelos basado en residuos orgánicos. En *Academia de Ciencias de la Región de Murcia*. <https://www.um.es/acc/wp-content/uploads/Carlos-Garcia-Izquierdo.pdf>
- García Centeno, L. J. (2017). *Manual: Metodologías de campo para determinar profundidad, densidad aparente, materia orgánica, infiltración del agua, textura y pH en el suelo*. Grupo SEVEN Nicaragua. <https://cenida.una.edu.ni/documentos/NP33G216m.pdf>
- García, Y., Ramírez, W., & Sánchez, S. (2012). Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos y Forrajes*, *35*(2), 14. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942012000200001
- G.J, Á. (2019). *Micronutrientes del suelo*. Fertibox. <https://www.fertibox.net/single-post/micronutrientes-del-suelo>

- Goh, K. (2004). Fertilizer recommendation systems for oil palm: Estimating the fertilizer rates. *Proceedings of MOSTA Best Practices Workshops: Agronomy and Crop Management*. https://www.researchgate.net/publication/228663105_Fertilizer_recommendation_systems_for_oil_palm_Estimating_the_fertilizer_rates
- González-Cárdenas, A. (2016). La Agroindustria De La Palma De Aceite en América. *Palmas*, 37(2), 215–228. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/11938/11931>
- González-Pedraza, A., Piñero-Calixtro, E., & Atencio-Pulgar, J. (2011). Actividad microbiana en suelos cultivados con palma aceitera, cacao, pasto y bosque natural. *Revista de La Facultad Agronomía de La Universidad de Zulia*, 28(1), 492–504.
- Guilcamaigua-Paztuñal, D., & Chancusig-Espín, E. (2016). Comparación de indicadores ambientales en tres casos de agricultura: tradicional, orgánica y convencional. *Antropología Cuadernos de Investigación*, 17, 71–85.
- Gutierrez-Palacio, G.-N. (2017). Efecto del cultivo de palma de aceite sobre las propiedades físicas del suelo y su relación con la producción y la pudrición de cogollo. *Lámpsakos*, 1(17), 20–28. <https://doi.org/10.21501/21454086.2390>
- Iglesias, M. T. (2008). Estudio del carbono de la biomasa microbiana en suelos alterados. *Lazaroa*, 29, 117–123. <https://doi.org/10.5209/LAZA.9704>
- IICA. (2016). *Seis iniciativas de agricultura climáticamente inteligente marcan la diferencia en los estados del Caribe oriental*. <https://www.iica.int/es/prensa/noticias/seis-iniciativas-de-agricultura-clim%C3%A1ticamente-inteligente-marcan-la-diferencia-en>
- Leblanc, H.-A., Russo, R., Cueva, J. J., & Subía, E. (2006). Fijación de carbono en palma aceitera en la región tropical húmeda de Costa Rica. *Tierra Tropical*, 2(2), 197–202.
- Lepsch, H. C., Brown, P. H., Peterson, C. A., Gaudin, A. C. M., & Khalsa, S. D. S. (2019). Impact of organic matter amendments on soil and tree water status in a California orchard. *Agricultural Water Management*, 222, 204–212. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.06.002>
- Lucero, D. (2022). *Estudio técnico - financiero para la elaboración de compost, a base de residuos de la extracción de aceite de la fruta fresca de palma*. Universidad Técnica del Norte.

- Macías, S. (2017). *Propuesta de valorización de los residuos especiales generados en la extracción de aceite de palma africana - Extractora Oleorios. Provincia de Los Ríos, vía Ventanas*. Universidad de Especialidades Espíritu Santo.
- Madrigal, Á., Palacios, A., & Garbanzo, G. (2020). *Evaluación de la ceniza agroindustrial de palma aceitera en suelos ácidos del Pacífico Sur, Costa Rica*.
- Madrigal-Valverde, Á., & Garbanzo-León, G. (2018). Uso de residuos agroindustriales en viveros de palma aceitera (*Elaeis guineensis*, *Arecaceae*): crecimiento y absorción de nutrientes. *UNED Research Journal*, *10*(2), 257–266. <https://doi.org/10.22458/urj.v10i2.2157>
- Mariategui, J.-C. (2012). Guía Técnica: Análisis de Suelos y Fertilización en el Cultivo de Palma Aceitera. *UNALM*, 32. <https://www.agrobanco.com.pe/data/uploads/ctecnica/30-c-palma-aceitera.pdf>
- Marín, S., Bertsch, F., & Castro, L. (2017). Efecto del manejo orgánico y convencional sobre propiedades bioquímicas de un andisol y el cultivo de papa en invernadero. *Agronomía Costarricense*, *41*(2). <https://doi.org/10.15517/rac.v41i2.31298>
- Masis-Azofeifa, J. (2022). *Charlas: Manejo y gestión de la pama de aceite, Palma Tica*.
- Mehlich, A. (1984). Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *15*(12), 1409–1416. <https://doi.org/10.1080/00103628409367568>
- Méndez, J.-C., & Bertsch-Hernández, F. (2012). *Guía para la interpretación de la fertilidad de los suelos de Costa Rica* (1st ed.). ACCS. https://www.researchgate.net/publication/279172745_Guia_para_la_interpretacion_de_la_fertilidad_de_los_suelos_de_Costa_Rica
- Michel, R. (2002). *Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra* (FAO, Ed.). <https://www.fao.org/3/bl001s/bl001s.pdf>.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2018). *Estado actual de la actividad de palma aceitera en Costa Rica*. <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/AV-1075.pdf>.

- Molina, D. C., & Anaya, R. (2018). Evaluación económica y financiera de las alternativas de uso de los residuos de materia prima de una planta industrial de extracción de palma de aceite. *Dictamen Libre*, 22, 81–101. <https://pdfs.semanticscholar.org/de61/e4b6dff9c2f7ccbaedf3a7062f5a82578c9d.pdf>
- Molina, E., & Meléndez, G. (2002). *Tabla de interpretación de análisis de suelos* (p. 20). CIA. <http://www.cia.ucr.ac.cr/sites/default/files/2021-09/05 Tablas Interpretación Análisis Foliar.pdf>
- Montiel, K., & Ibrahim, M. (2016). Manejo integrado de suelos para una agricultura resiliente al cambio climático. *IICA*, 29. <https://repositorio.iica.int/handle/11324/8681>
- Mora-Chacón, J. (2019). *Caractertización del suelo en el parche boscoso de la Finca Experimental Interdisciplinaria de Modelos Agroecológicos (FEIMA)*. Universidad de Costa Rica. <https://www.ingbiosistemas.ucr.ac.cr/wp-content/uploads/2020/12/TFG-JosueMoraChacon.pdf>
- Mosquera, B., Escandón, S., & Coral, P. (2010). *Manual para elaborar y aplicar abonos y plaguicidas orgánicos* (p. 24). Fondo para la Protección del Agua. http://www.fonag.org.ec/doc_pdf/abonos_organicos.pdf
- Munévar-Martínez, F. (1998). Problemática de los suelos cultivados con palma de aceite en Colombia. *Palmas*, 19(Número Especial), 218–228. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/667/667>
- Munévar-Martínez, F., Bautista, P.-N. F., & Arias-Arias, N.-A. (2016). Guía general para el muestreo foliar y de suelos en cultivos de palma de aceite. In *Centro de Investigación en Palma de Aceite* (3ra ed., Issue 37). Centro de Investigación en Palma de Aceite. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/boletines/article/download/11857/11853/>
- Murillo-Montoya, S. A., Mendoza-Mora, A., & Fadul-Vasquez, C. J. (2020). La importancia de las enmiendas orgánicas en la conservación del suelo y la producción agrícola. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 7(1), 58–68. <https://doi.org/https://doi.org/10.23850/24220582.2503>

- Navarro-Bravo, A., Figueroa-Sandoval, B., Martínez-Menes, M., González-Cossio, F., & Osuna-Ceja, E.-S. (2008). Indicadores físicos del suelo bajo labranza de conservación y su relación con el rendimiento de tres cultivos. *Agricultura Técnica En México*, 34(2), 151–158.
- Novillo Espinoza, I. D., Carrillo Zenteno, M. D., Cargua Chavez, J. E., Nabel Moreiral, V., Albán Solarte, K. E., & Morales Intriago, F. L. (2018). Propiedades físicas del suelo en diferentes sistemas agrícolas en la provincia de Los Ríos, Ecuador. *Temas Agrarios*, 23(2), 177–187. <https://doi.org/10.21897/rta.v23i2.1301>
- Obi, M. E., & Ebo, P. O. (1995). The effects of organic and inorganic amendments on soil physical properties and maize production in a severely degraded sandy soil in southern Nigeria. *Bioresource Technology*, 51(2–3), 117–123. [https://doi.org/10.1016/0960-8524\(94\)00103-8](https://doi.org/10.1016/0960-8524(94)00103-8)
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2010). *Agricultura “climáticamente inteligente”: Políticas, prácticas y financiación para la seguridad alimentaria, adaptación y mitigación*. <https://www.fao.org/3/i1881s/i1881s.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2015). *Climate-Smart Agriculture: A call for action*. <https://www.fao.org/3/i4904e/i4904e.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2018). *Libro de consulta sobre la agricultura climáticamente inteligente*. <https://www.fao.org/3/I7994ES/i7994es.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2019). *Procedimiento operativo estándar para la determinación de carbono total del suelo*. <https://www.fao.org/3/ca7781es/ca7781es.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2022). *Propiedades físicas del suelo*. Portal de Suelos de La FAO. <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/>
- Ortiz, C. J., & Hernanz, J. L. (1989). *Técnica de la mecanización agraria*. (3rd ed.). Mundi-Prensa.
- Owen-Barlett, E.-J. (1992). Fertilización de la palma africana (*Elaeis Guineensis* Jacq.) en Colombia. *Palmas*, 13(2), 39–64.

- Owen-Barletto, E. J. (1995). Características físico-químicas del suelo y su incidencia en la absorción de nutrimentos, con énfasis en el cultivo de la palma de aceite. *Palmas*, 16(1), 31–39.
- Pane, R. D. P., Farrasati, R., Darlan, N. H., Rahutomo, S., Santoso, H., Ginting, E. N., Pradiko, I., & Hidayat, F. (2022). Study of soil bacteria and fungi population in oil palm with big hole planting system. *Berkala Penelitian Hayati*, 27(2), 91–97. <https://doi.org/10.23869/bphjbr.27.2.20226>
- Paolini, J. (2018). Actividad microbiológica y biomasa microbiana en suelos cafetaleros de los Andes venezolanos Microbial activity and microbial biomass in coffee soils of the Venezuelan Andes. *Tierra Latinoamericana*, 36(1), 13–22.
- Pardo-Plaza, Y. J., Paolini Gómez, J. E., & Cantero-Guevara, M. E. (2019). Biomasa microbiana y respiración basal del suelo bajo sistemas agroforestales con cultivos de café. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 22(1), 1–8. <https://doi.org/10.31910/rudca.v22.n1.2019.1144>
- Pérez, A., Céspedes, C., & Núñez, P. (2007). Caracterización física-química y biológica de enmiendas orgánicas aplicadas en la producción de cultivos en República Dominicana. *Revista de La Ciencia Del Suelo y Nutrición Vegetal*, 8(3), 10–29. https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-27912008000300002
- Prieto-Sandoval, V., Jaca, C., & Ormazabal, M. (2017). Economía circular: Relación con la evolución del concepto de sostenibilidad y estrategias para su implementación. *Memoria Investigaciones En Ingeniería*, 15, 85–95.
- Pupin, B., Freddi, O. da S., & Nahas, E. (2009). Microbial alterations of the soil influenced by induced compaction. *Revista Brasileira de Ciencia Do Solo*, 33(5), 1207–1213. <https://doi.org/10.1590/s0100-06832009000500014>
- Ritchie, H., & Roser, M. (2021). *Forest and Deforestation: Palm Oil*. Our World in Data. <https://ourworldindata.org/palm-oil#citation>
- Romero-Ruiz, H.-K. (2019). *Efecto de la aplicación de diferentes dosis de cenizas de palma aceitera (Elaeis guineensis) en el biol generado en la PTARI OLAMSA CFB Km 59800*,

Departamento de Ucayali - 2019 [Universidad Nacional de Ucayali].
<http://repositorio.unu.edu.pe/handle/UNU/4510>

Ropero Portillo, S. (2020). *Efecto de las enmiendas sobre la actividad microbiológica de un suelo contaminado con elementos traza* [Universidad Pablo de Olavide].
[https://digital.csic.es/bitstream/10261/230236/1/Efecto de las enmiendas sobre la actividad microbiológica_TFM_2020.pdf](https://digital.csic.es/bitstream/10261/230236/1/Efecto%20de%20las%20enmiendas%20sobre%20la%20actividad%20microbiol%C3%B3gica_TFM_2020.pdf)

Rosa, J., Santa, A., Fernández, E., López, R., & Campos, P. (2021). *Aplicación de residuos vegetales transformados para una agricultura sostenible: efectos en la germinación, necesidades hídricas y productividad*. Universidad Santo Tomás.

Rosales-Escalante, E. (n.d.). ¿Cómo hacer pruebas de infiltración? *CFIA*, 28–31.
<https://cfia.or.cr/descargas/infiltracion.pdf>

Rotondo, R., Firpo, I. T., Ferreras, L., Toresani, S., Fernández, S., & Gómez, E. (2009). Efecto de la aplicación de enmiendas orgánicas y fertilizante nitrogenado sobre propiedades edáficas y productividad en cultivos hortícolas. *Horticultura Argentina*, 28(66), 18–25.

Rowse, H. R., & Goodman, D. (1981). Axial Resistance to Water Movement in Broad Bean (*Vicia faba*) Roots. *Journal of Experimental Botany*, 32(3), 591–598.
<https://doi.org/10.1093/jxb/32.3.591>

Rozieta, R., Sahibin, A. R., & Wan Mohd Razi, I. (2015). Physico-chemical properties of soil at oil palm plantation area, Labu, Negeri Sembilan. *AIP Conference Proceedings*, 1678.
<https://doi.org/10.1063/1.4931216>

Rubio Gutiérrez, A. M. (2010). *La densidad aparente en los suelos forestales del Parque Natural Los Alcornocales*. Universidad de Sevilla. <https://digital.csic.es/handle/10261/57951>

Ruiz, J., Medina, G., González, I., Flores, H., Ramírez, G., Ortiz, C., Byerly, K., & Martínez, R. (2013). *Requerimientos agroecológicos de cultivos* (2da ed.).

Santacruz, L. (2021). *Importancia del boro en la productividad y conformación del racimo en el cultivo de palma de aceite*. https://www.grepalma.org/wp-content/uploads/2021/06/BOLETIN-LA-PALMA-19_junio-2021.pdf

- Sergieieva, K. (2022). *Cultivo de palma de aceite: Gestión y consejos*. EOS Data Analytics. <https://eos.com/es/blog/cultivo-de-palma-de-aceite/#:~:text=>.
- Soh, A. C., Mayes, S., & Roberts, J. (Eds.). (2017). *Oil Palm Breeding*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315119724>
- Technoserve. (2019). *Manual Técnico de Palma Africana*. <https://palma.webcindario.com/manualpalma.pdf>
- Tiemann, T. T., Donough, C. R., Lim, Y. L., Härdter, R., Norton, R., Tao, H. H., Jaramillo, R., Satyanarayana, T., Zingore, S., & Oberthür, T. (2018). Feeding the Palm: A Review of Oil Palm Nutrition. *Advances in Agronomy*, 152, 149–243. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2018.07.001>
- Torri, S., Urricariet, S., Ferraris, G., & Lavado, R. (2010). Micronutrientes en agrosistemas. In *Fertilidad de Suelos. Caracterización y manejo en la Región Pampeana* (pp. 395–423). Editorial Facultad de Agronomía. https://www.academia.edu/34681892/Micronutrientes_en_agrosistemas
- ÚKZUZ, Vlk, L., Horová, M., Krejča, R., & Špejra, R. (2014). *Soil Analysis using Mehlich 3 Extractant Technique for Sample Preparation*. [https://www.teledynacetac.com/resourceSite/Application Notes/HAM0852.pdf](https://www.teledynacetac.com/resourceSite/Application%20Notes/HAM0852.pdf)
- Urra, J. (2020). *Beneficios y riesgos de la aplicación de enmiendas orgánicas sobre la salud de suelos agrícolas*. Universidad del País Vasco.
- USDA. (2021). *Palm Oil Explorer*. https://ipad.fas.usda.gov/cropeplorer/cropview/commodityView.aspx?cropid=4243000&sel_year=2019
- Vallejo Quintero, V. E. (2013). Importancia y utilidad de la evaluación de la calidad de suelos a través del componente microbiano: Experiencias en sistemas silvopastoriles. *Colombia Forestal*, 16(1), 83–99. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2013.1.a06>
- Vance, E. D., Brookes, P. C., & Jenkinson, D. S. (1987). An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*, 19(6), 703–707.

- Vásquez-Granda, V.-D. (2001). *Evaluación de enmiendas a suelos con niveles altos de calcio en una plantación joven de palma africana (Elaeis guineensis)* [ZAMORANO]. <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/5158/1/CPA-2001-T087.pdf>
- Vázquez, J., Alvarez-Vera, M., Iglesias-Abad, S., & Castillo, J. (2020). The incorporation of organic amendments in the form of compost and vermicompost reduces the negative effects of monoculture in soils. *Scientia Agropecuaria*, *11*(1), 105–112. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.01.12>
- Velez, A., & Verona, J. M. (2018). *Influencia de enmienda orgánica “Inkan negro” a partir de biocarbón y gallinasa, en la optimización de la agricultura sostenible* [Universidad Científica del Sur]. <https://repositorio.cientifica.edu.pe/handle/20.500.12805/640>
- Villón-Bejar, M. (2006). *Drenaje* (1st ed.). Tecnológico de Costa Rica.
- Volverás-Mambuscay, B., Campo-Quesada, J. M., Merchancano-Rosero, J. D., & López-Rendón, J. F. (2020). Propiedades físicas del suelo en el sistema de siembra en wachado en Nariño, Colombia. *Agronomía Mesoamericana*, 743–760. <https://doi.org/10.15517/am.v31i3.39233>
- Woittiez, L., Wijk, M. van, Slingerland, M., Noordwijk, M. van, & Giller, K. (2018). Brechas de rendimiento en el cultivo de palma de aceite: una revisión cuantitativa de factores determinantes. *Palmas*, *39*(1), 16–68.
- Zambrano-Yepes, J., Herrera-Valencia, W., & Motta-Delgado, P. A. (2020). Concentración de los macronutrientes del suelo en áreas de pastoreo del departamento de Caquetá, Amazonia colombiana. *Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, *21*(3), 1–12. https://doi.org/10.21930/rcta.vol21_num3_art:1673

10. ANEXOS

Anexo 1. Tabla general de los indicadores de calidad con sus respectivos valores ICSA

	Tratamiento de adición de enmiendas	Tratamiento de fertilización convencional
Indicadores físicos		
Conductividad hidráulica	0,37	0,25
Total indicadores físicos	0,37	0,25
Indicadores microbiológicos		
Biomasa microbiana	0,85	0,86
Fijadores de nitrógeno	0,52	0,43
Total indicadores microbiológicos	1,37	1,29
Indicadores químicos		
Potasio	0,68	0,67
Nitrógeno (%)	0,84	0,87
Zinc	0,51	0,75
Hierro	0,91	0,92
Fósforo	0,62	0,65
Total indicadores químicos	3,56	3,86
Total general	5,29	5,40

Anexo 2. Toma de muestras de suelo con barreno.



Anexo 3. Prueba de infiltración mediante el método Porchet.



Anexo 4. Toma de muestras en cilindros de PVC para Conductividad Hidráulica.



Anexo 5. Análisis de muestras en laboratorio.



Anexo 6. Etiquetado de muestras para análisis de laboratorio.



Anexo 7. Integrantes del proyecto. De izquierda a derecha: Tomás Rodríguez Cordero y Daniel Ávila Villalobos.

