



UNIVERSIDAD PERUANA
CAYETANO HEREDIA

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

**La huella ecológica del cultivo de la palma aceitera en el Perú: factores
determinantes y estrategias de reducción**

Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Autores:

Enzo Renato Baltazar Cueva

Mirko Frank Lizarbe Fuertes

Asesor:

Mg. Luis Ramon Huaman Mesia

Lima, Perú

2025

Jurado calificador

Presidente: Mg. Victor Alberto Huanambal Sovero

Vocal: Dra. Rossana Paredes Salcedo

Secretario: Mg. Denis Helan Castillo Pareja



DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

Los egresados:

| Nº | APELLIDOS Y NOMBRES |
|----|-----------------------------|
| 1. | BALTAZAR CUEVA ENZO RENATO |
| 2. | LIZARBE FUERTES MIRKO FRANK |

Pertenecientes al programa de la **CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**, autores del trabajo titulado: **La huella ecológica del cultivo de la palma aceitera en el Perú: factores determinantes y estrategias de reducción**, el cual ha sido elaborado, sustentado y aprobado, según corresponda, para optar por el **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL** bajo la modalidad de **TESIS**.

En calidad de docentes asesores de la Universidad Peruana Cayetano Heredia:

| Nº | APELLIDOS Y NOMBRES DEL DOCENTE | FACULTAD | NIVEL DE ASESORÍA |
|----|---------------------------------|----------|-------------------|
| 1. | HUAMAN MESIA LUIS RAMON | FACI | ASESOR |

Declaramos que el contenido del presente documento es original y que las citas y referencias a otros autores cumplen con las normas académicas establecidas. En ese sentido, hacemos constar que:

- El documento presenta un porcentaje de similitud de **15%**, según el reporte emitido por el software **Turnitin®** (identificador de entrega: **3373140040**; fecha de entrega: **14/10/2025**).
- Tras una revisión detallada del reporte y del contenido del trabajo en cuestión, no se han identificado indicios de plagio.
- Se certifica que el documento respeta los principios de integridad académica y cumple con los requisitos institucionales de originalidad.

Lugar y fecha: **Lima, 14 de octubre de 2025**

Firma del asesor

Nº DNI: 08704404

ORCID: 0000-0002-5156-7379

Índice

| | |
|---|----|
| Resumen | 1 |
| Abstract | 2 |
| I. Introducción | 3 |
| 1.1. Palma aceitera | 3 |
| 1.2. Huella ecológica..... | 4 |
| 1.3. Revisión y medición de la huella ecológica en cultivos | 6 |
| 1.4. Factores determinantes de la huella ecológica del cultivo de la palma aceitera | 8 |
| 1.5. Estrategias para la Reducción de la Huella Ecológica en el Cultivo de palma aceitera..... | 9 |
| 1.6. Justificación | 12 |
| II. Pregunta de investigación | 13 |
| III. Objetivos | 13 |
| 3.1. Objetivo General..... | 13 |
| 3.2. Objetivos Específicos..... | 13 |
| IV. Metodología | 14 |
| 4.1. Tipo de estudio..... | 14 |
| 4.2. Área de estudio | 15 |
| 4.3. Actividades | 17 |
| 4.4. Análisis de información | 21 |
| 4.4.1. Operacionalización de variables..... | 21 |
| 4.4.2. Metodología para el análisis de casos..... | 22 |
| 4.4.3. Herramientas y software utilizados para el análisis y obtención de resultados..... | 25 |
| V. Resultados | 27 |
| 5.1. Análisis de las estrategias sostenibles en la reducción de la huella ecológica de la Palma Aceitera | 27 |
| 5.2. Clasificación de la eficiencia de estrategias sostenibles en la reducción de la huella ecológica de la Palma Aceitera..... | 32 |
| VI. Discusión | 37 |
| 6.1. Estrategias sostenibles para la reducción de la huella ecológica en el cultivo de palma aceitera | 37 |
| 6.2. Factores determinantes que influyen la adopción de estrategias sostenibles | 39 |
| 6.3. Comparar factores determinantes en la reducción de la huella ecológica del cultivo de palma aceitera en Perú | 42 |
| VII. Conclusiones | 46 |
| VIII. Recomendaciones | 47 |
| IX. Bibliografía | 48 |
| Anexos | 68 |

Resumen

El cultivo de la palma aceitera (*Elaeis guineensis*) en el Perú ha crecido aceleradamente en las últimas décadas, generando preocupaciones ambientales debido a su impacto en la deforestación, el uso intensivo de agroquímicos y la degradación del suelo. Esta investigación analiza los factores determinantes que influyen en la adopción de estrategias sostenibles para reducir la huella ecológica del cultivo en el territorio peruano.

Se realizó una revisión sistemática aplicando el método PRISMA, se identificaron cinco factores determinantes que condicionan la sostenibilidad del cultivo: educativo, social, económico, tecnológico y ambiental. Para evaluar la eficiencia de las estrategias de mitigación, se consideraron cinco indicadores de impacto: huella de carbono, huella hídrica, huella energética, uso de la tierra y empleo de agroquímicos. A partir de este análisis, se identificaron cinco estrategias más eficientes para reducir la huella ecológica: el uso de biocarbón, que mejoró la fertilidad del suelo y redujo las emisiones de carbono; el uso de microbiomas en el cultivo, que fortaleció la salud del suelo; la protección del suelo con leguminosas rastreras, que mejoró la fijación de nitrógeno y redujo la erosión; el aprovechamiento de racimos de fruta vacíos (RFV) como abono, que optimizó el uso de residuos orgánicos; y la promoción de la siembra de nuevas áreas de palma aceitera en zonas ya intervenidas, que evitó una mayor deforestación y contribuyó a la restauración de suelos degradados.

Los resultados evidencian que para contextos internacionales, estas estrategias han logrado reducir impactos negativos del cultivo, lo que sugiere que su aplicación en el Perú podría contribuir a una producción más sostenible. Se concluye que promover la adopción de prácticas agrícolas sostenibles es esencial para mitigar impactos ambientales y optimizar el uso de los recursos naturales, asegurando una producción más eficiente y equilibrada.

Palabras claves: palma aceitera, huella ecológica, estrategias de reducción, factores determinantes, sostenibilidad.

Abstract

Oil palm (*Elaeis guineensis*) cultivation in Peru has grown significantly in recent decades, raising environmental concerns due to its impact on deforestation, intensive use of agrochemicals, and soil degradation. This research analyzes the determining factors that influence the adoption of sustainable strategies to reduce the ecological footprint of the crop in Peru.

A systematic review was conducted using the PRISMA method, identifying five determining factors that determine the sustainability of the crop: educational, social, economic, technological, and environmental. To evaluate the effectiveness of mitigation strategies, five impact indicators were considered: carbon footprint, water footprint, energy footprint, land use, and agrochemical use. Based on this analysis, five most effective strategies for reducing the ecological footprint were identified: the use of biochar, which improved soil fertility and reduced carbon emissions; the use of microbiomes in the crop, which strengthened soil health; soil protection with creeping legumes, which improved nitrogen fixation and reduced erosion; the use of empty fruit bunches (EFB) as fertilizer, which optimized the use of organic waste; and the promotion of planting new areas of oil palm in already affected areas, which prevented further deforestation and contributed to the restoration of degraded soils.

The results show that in international contexts, these strategies have successfully reduced the negative impacts of the crop, suggesting that their application in Peru could contribute to more sustainable production. It is concluded that promoting the adoption of sustainable agricultural practices is essential to mitigate environmental impacts and optimize the use of natural resources, ensuring more efficient and balanced production.

Keywords: oil palm, ecological footprint, reduction strategies, determining factors, sustainability.

I. Introducción

1.1. Palma aceitera

La palma aceitera o conocida científicamente como *Elaeis guineensis*, es una planta de tipo palmera proveniente del continente de África, que en la actualidad se encuentra cultivada y distribuida en todas las partes del mundo [1]. Las propias características de la palma de aceite junto con las condiciones climáticas que necesita para existir hacen que su producción se restrinja a climas húmedos [2]. Debido a que es una planta tropical, la palma de aceite requiere de elevadas temperaturas durante todo el año, necesita de una adecuada radiación solar de como mínimo 5 horas diarias [1]. Además, *Elaeis guineensis* requiere para su desarrollo óptimo, crecer en un clima que cuente con una precipitación abundante de 2000 mm a 2500 mm distribuidos uniformemente de manera anual sin periodos de sequía largos, humedad relativa entre 75% - 85%, y una altitud baja sin elevaciones superiores a 500 msnm [3]. Es común que esta especie sea cultivada para usos comerciales, en estados semi-silvestres o incluso silvestres. Este cultivo está considerado como uno de los que presenta mayor rendimiento en la producción de aceite a nivel mundial, ya que genera una mayor cantidad de aceite por unidad de superficie en comparación con otros cultivos oleaginosos [4].

La palma aceitera se distingue por su ciclo de producción, ya que comienza a generar sus primeros frutos aproximadamente a los 3 años de su siembra [1]. Con el tiempo, produce una cantidad considerable de aceite, alcanzando entre 3 y 8 veces más por hectárea en comparación con otros cultivos oleaginosos, lo que le otorga una ventaja notable [1]. Además, mantiene su capacidad productiva durante unos 25 años, consolidándose como un cultivo de rendimiento elevado y sostenible [1]. Asimismo, destaca por su alta productividad por hectárea en comparación con otros aceites vegetales, como lo demuestran estudios realizados como el de Kumar [5], en este demuestra que la rentabilidad potencial del aceite de palma es destacada, ya que se necesitan 14 millones de hectáreas para producir 53 millones de toneladas, en comparación con los 104 millones de hectáreas requeridas para producir 41 millones de toneladas de aceite de soya [5]. Por otro lado, según Murphy et al [6], y los estudios que ha realizado a nivel global, señalan que los cultivos de palma aceitera producen 81 millones de toneladas (Mt) anuales de aceite en aproximadamente 19 millones de hectáreas (Mha), mientras que el segundo y

tercer cultivo de aceites vegetales, la soya y la colza, producen en conjunto 84 Mt de aceite, pero ocupan más de 163 Mha de tierra cultivable cada vez más escasa. Es decir, la palma aceitera es una especie que ofrece más producción por menos área lo que la hace mucho más rentable [6].

Cabe mencionar que el aceite de palma es el que más se consume mundialmente incluso más que el aceite de soya y juntos conforman más del 50% de lo que se consume en la categoría de aceites y grasas vegetales [5]. A nivel mundial, China es el país que más aceite consume, sin embargo, en América los países que realizan mayores importaciones de aceite de palma son Estados Unidos, Canadá y México [5]. La mayoría de la producción de aceite de palma a nivel mundial proviene de Indonesia y Malasia y a su vez representan más del 80% de lo que se produce en el mundo. Aproximadamente el 90% de las exportaciones destinadas a los principales mercados de América, proceden de Malasia con una participación del 60%, seguido por Indonesia con el 34% y Colombia con el 6%. Más del 90% de las exportaciones de Malasia a América del Norte van a los Estados Unidos, que es el cuarto importador más grande a nivel mundial [5]. En el ámbito del Perú, el Plan Nacional de Promoción de la Palma Aceitera (2000-2010) influyó en la expansión del cultivo de palma [7]. Este plan tuvo el objetivo de promover la expansión de la palma aceitera, lo que resultó en una serie de actividades importantes, como la replicación del modelo de Naciones Unidas, que buscaba fomentar el desarrollo alternativo en áreas previamente dedicadas al cultivo de coca, en varias zonas, incluyendo el Pongo de Caynarachi y la cuenca del Aguaytía [8]. Además, este plan se asoció con la creación de empresas y asociaciones para gestionar las plantaciones y procesar el aceite de palma, lo que impulsó aún más la expansión de la industria en la región amazónica [8].

1.2. Huella ecológica

La huella ecológica puede definirse como la demanda que exige la humanidad en relación con la biocapacidad de la tierra en términos de recursos [9]. Así mismo, también es un indicador de la sostenibilidad ambiental, es de carácter integrador ya que engloba a los individuos, su entorno que los rodea, los recursos naturales que consumen y los desechos generados por estos mismos [10]. Por ello, la huella ecológica en los últimos años ha tenido una gran aceptación por parte de instituciones y organizaciones ambientales, lo que ha generado diversos estudios a nivel mundial y aumentado considerablemente su

importancia [11]. Por el motivo de la creciente producción y excesivo consumo de materia prima proveniente de sistemas naturales ha nacido una preocupación que se va expandiendo con el transcurso del tiempo de encontrar y medir factores determinantes para analizarlos y proponer estrategias de reducción para así llegar a una producción mucho más controlada y sustentable, así como un consumo más responsable [12].

Para medir la huella ecológica se toman en cuenta varios elementos desde un enfoque holístico. Para ello, se toma una área delimitada arbitrariamente, los habitantes existentes, la superficies productivas alteradas por acciones antropogénicas dentro en un periodo de tiempo; todos estos factores tienen gran implicancia en la medida de la huella ecológica [12]. Según el informe de la Global Footprint Network con datos de 2012, a nivel global la demanda de recursos es de 2.7 hectáreas por persona, mientras que la capacidad del planeta para proporcionarlos es de aproximadamente 2 hectáreas per cápita [13]. Estas cifras varían considerablemente entre regiones: en Estados Unidos, la huella ecológica es de 8.2 hectáreas per cápita, en España de 3.7, y en Angola apenas 0.9 hectáreas por persona, lo que demuestra que los países desarrollados están consumiendo mucho más de lo que el planeta puede regenerar, reduciendo cada año la capacidad de sostenibilidad global [13]. A nivel de América Latina, en México, estudios realizados por el gobierno revelan un panorama preocupante: la huella ecológica promedio es de 2.7 hectáreas por persona, mientras que la capacidad del planeta para asimilar este consumo es de solo 1.8 hectáreas, generando un notable déficit ecológico [12]. Esta "deuda ecológica" refleja que cada persona utiliza más recursos de los que la Tierra puede ofrecer de manera sostenible. Investigaciones más recientes del Centro de Educación y Capacitación para el Desarrollo Sustentable (Cecadesu) en México indicaron que en 2006 la huella ecológica había aumentado a 3.4 hectáreas por persona, lo que resulta aún más alarmante [12]. En Ecuador, la huella ecológica también ha mostrado un aumento considerable: entre 2008 y 2009, mientras la población creció un 1.8%, la huella ecológica per cápita se incrementó un 6.11%, pasando de 1.53 a 1.62 hectáreas globales (hag) en solo un año [14]. Por su parte, en Perú, la huella ecológica per cápita en 2007 fue de 1.54 hectáreas globales (hag), y si esta tendencia continúa, se estima que a partir de la próxima década el país se sumará a las naciones cuyo consumo supera la capacidad ecológica del planeta, como México, España, Estados Unidos, Chile, Argentina y Francia [15]. Por otro lado, se menciona que

la agricultura está dentro de las actividades de desarrollo que más han aportado con la huella ecológica, seguidas de la quema de combustibles fósiles y la agricultura [16].

1.3. Revisión y medición de la huella ecológica en cultivos

En el mundo, diversos estudios han abordado la huella ecológica relacionada a la agricultura. Por ejemplo, Charongpun et al. [17], evaluaron la huella ecológica de las plantaciones de palma aceitera en Tailandia, considerando el uso de tierra, agua, energía y químicos. Entre los resultados más importantes, encontraron que las plantaciones en el este de Tailandia tenían la mayor huella ecológica debido al alto consumo de agua y químicos. La metodología incluyó la conversión de uso de recursos a huella ecológica, calculada en hectáreas globales (hag). Por otro lado, en la investigación de Jaibumrung et al. [18], se reveló una amplia variación en la huella ecológica del cultivo de arroz en Tailandia, con valores entre 1,37 y 3,33 hag/t para el cultivo principal y entre 1,39 y 2,64 hag/t para el segundo cultivo. Se utilizó una metodología que incluyó la recopilación de datos climáticos y agrícolas durante un período de diez años. Además, se emplearon modelos como CROPWAT 8.0 para calcular el consumo de agua y técnicas específicas para reducir su uso en el cultivo. Todos los insumos y procesos, desde la preparación del suelo hasta el procesamiento en molinos de arroz, fueron considerados para evaluar la huella ecológica, permitiendo una evaluación integral del impacto ambiental en diversas regiones tailandesas. También, en el estudio de Mo li et al. [19], se evaluó la huella ecológica del uso de tierras de cultivo en Heilongjiang, China, considerando variables como eficiencia en el uso del agua, beneficio económico, equidad en la asignación de recursos y emisiones de gases de efecto invernadero. Utilizaron un modelo de optimización multiobjetivo y análisis detallado de los subcomponentes de tierras de cultivo para obtener índices de eficiencia y equilibrio ecológico. Recomendaron estrategias para promover un uso más sostenible de las tierras de cultivo.

Por otro lado, el estudio de Carpintero [20], analiza la huella ecológica del consumo alimentario en España, destacando el impacto ambiental del aumento en el consumo de carne y pescado a escala nacional. La metodología utilizada revela que, aunque el consumo de pescado es bajo en calorías, su huella ecológica es relevante debido a la baja productividad marina. De manera similar, el consumo de carne tiene un gran impacto en el uso del territorio y los recursos. La conclusión destaca la importancia de comprender y

cuantificar esta huella para promover prácticas alimentarias más sostenibles y mitigar su impacto en el medio ambiente. Por otro lado, el estudio de Laguna [21], examina específicamente la huella ecológica del cultivo del olivo en España, destacando su importancia económica y ambiental en el paisaje mediterráneo. Utilizando métodos convencionales, se calcula la huella ecológica considerando factores como la superficie agrícola y el consumo de energía. Los resultados muestran que, en general, el cultivo del olivo en España es sostenible desde el punto de vista ecológico. Sin embargo, se señala que ciertas prácticas, especialmente en terrenos inclinados, pueden resultar insostenibles y requerir medidas adicionales para mitigar su impacto ambiental.

En el estudio de Swelam et al. [22], se evaluó la huella hídrica (HH) y el uso de agua de cultivo (CWU) para trigo y maíz en tres zonas agroclimáticas de Egipto: Delta del Nilo, Egipto Medio y Alto Egipto. Se utilizaron datos climáticos para estimar la evapotranspiración de referencia (ET_o) y calcular la HH basada en agua azul y gris, excluyendo el agua verde debido a la baja precipitación. Los resultados mostraron que la huella hídrica promedio para maíz varió entre 1067 y 2232 m³/ton, y para trigo entre 923 y 1452 m³/ton, dependiendo de la región y el tipo de suelo. El uso de agua para maíz fue de 6211 a 8007 m³/ha y para trigo de 4348 a 5774 m³/ha, con mayores valores en regiones más cálidas y secas. Estos resultados destacan la influencia de la variabilidad climática en el consumo de agua y subrayan la necesidad de ajustar la gestión de recursos hídricos y la selección de cultivos según las características climáticas locales para mejorar la eficiencia del uso del agua agrícola. Finalmente, en el estudio de Ye li et al. [23], se evaluó la huella de carbono en la producción de morera en la ciudad de Haining, China, enfocándose en las emisiones indirectas causadas por fertilizantes, mano de obra, estiércol y pesticidas, y comparándolas con la captura de carbono a través de la fotosíntesis. La metodología incluyó el análisis de datos de emisiones de carbono en los años 2014, 2015 y 2016, destacando que las emisiones más altas ocurrieron en 2016. Los resultados indicaron que las emisiones totales de carbono son menores que la capacidad de captura de carbono de la morera, resultando en una emisión neta de carbono negativa y una eficiencia ecológica positiva, ya que la planta actúa como un sumidero de carbono que compensa más las emisiones de las que genera. Se observó que el uso de insumos industriales y la fertilización influyen en gran medida en las emisiones. Para mejorar la

sostenibilidad, se recomendó reducir los insumos industriales y adoptar técnicas avanzadas de cultivo.

En Sudamérica, el estudio de Ardisana et al. [24] examinó la producción agrícola en la región, comparándola con variables ambientales como el uso de la tierra y la utilización de insumos contaminantes. Se utilizó una metodología que integró investigación documental y análisis multivariado para obtener agrupamientos entre países. Se encontró que Sudamérica presenta una diversa producción agrícola, pero con una marcada huella ecológica debido al alto consumo de fertilizantes y plaguicidas. Esto resalta la necesidad de equilibrar la alimentación de la población con la preservación del ambiente, siendo esta una tarea pendiente para los actores sociales vinculados a la producción agrícola en Sudamérica. Finalmente, en el Perú, la investigación sobre la huella ecológica es limitada, mayormente existen trabajos académicos de tesis como el de Meza [25] y Jaimez [26], que incluyen estudios sobre la huella ecológica en la población del Distrito de Yauyos, Jauja, y la estimación de la huella ecológica de la Universidad Peruana Unión. Sin embargo, se destaca la investigación de Acuña y Ccsani [27], que analiza la huella ecológica de la producción de café pergamino seco en Cajamarca. Utilizando una metodología que considera diversos factores, incluida la producción y el transporte de sacos de café, se calcula la huella ecológica. Los resultados muestran un déficit ecológico positivo, lo que sugiere que la capacidad de producción supera el impacto ambiental. Esto subraya la importancia de adoptar prácticas agrícolas sostenibles para reducir el impacto ambiental en las zonas rurales.

1.4. Factores determinantes de la huella ecológica del cultivo de la palma aceitera

La expansión del cultivo de la palma aceitera en el Perú ha generado preocupaciones debido a su impacto ambiental [7,8]. En los últimos años, se ha observado un aumento en el uso indiscriminado de agroquímicos, incluyendo herbicidas, fungicidas e insecticidas, lo que ha comprometido la seguridad alimentaria y deteriorado la biodiversidad del suelo [28,29]. Este fenómeno se atribuye principalmente a la expansión sin control de la agricultura, que representa una amenaza para los ecosistemas naturales y la biodiversidad global [29]. El cultivo de la palma aceitera contribuye de manera considerable a este problema debido a su uso intensivo de pesticidas, que contaminan cuerpos de agua, causa pérdida y deterioro considerable de la diversidad biológica, degradación del suelo y

contaminación del aire [30,31,32,33]. A su vez, el desarrollo de plantaciones de palma aceitera está estrechamente vinculado a la deforestación, especialmente en bosques tropicales primarios [34,35]. Entre 2006 y 2013, la extensión de tierras dedicadas al cultivo de palma aceitera en América Latina experimentó un aumento del 73%, incluyendo un crecimiento considerable en países como México, Panamá, Guatemala y Perú [7]. En particular, en la Amazonía peruana, la expansión de las plantaciones de palma aceitera ha resultado en una deforestación notable de aproximadamente 80 mil hectáreas hasta antes de 2018, implicando la tala de extensas áreas boscosas [7]. Ante esta problemática, es crucial adoptar enfoques que fomenten la producción de aceite de palma sin deforestación en explotaciones a menor escala, lo que podría ayudar a reducir el impacto en la biodiversidad [36].

En Perú, la huella ecológica del cultivo de palma aceitera se ve notablemente afectada por la deforestación masiva, que destruye valiosos sumideros de carbono y provoca una pérdida considerable de biodiversidad y degradación del suelo, como señala el estudio de Escobedo [37]. La expansión descontrolada de estas plantaciones libera grandes cantidades de carbono almacenado y contribuye a la contaminación por agroquímicos [37]. El uso excesivo de estos productos altera los ecosistemas locales y reduce la fertilidad del suelo, resultando en infertilidad, acidificación y erosión [38]. La aplicación convencional, mediante pulverización, es ineficiente, ya que gran parte del componente activo se pierde por lixiviación, degradación y volatilización, contaminando cuerpos de agua y contribuyendo a la eutrofización [38]. Esto genera la necesidad de aplicaciones repetidas en concentraciones excesivas, lo que incrementa costos y disminuye la sostenibilidad [38]. Además, la liberación de óxido nitroso debido a la fertilización intensiva agrava el cambio climático, intensificando aún más la huella ecológica del cultivo [38]. Por lo tanto, es crucial adoptar una gestión más sostenible que reduzca el uso de agroquímicos, integrando prácticas agroecológicas que restauren la salud de los ecosistemas y garanticen la sostenibilidad del cultivo de palma aceitera en el país [39].

1.5. Estrategias para la Reducción de la Huella Ecológica en el Cultivo de palma aceitera

La implementación de técnicas de agricultura sostenible de aceite de palma puede aminorar los problemas sociales y ambientales que ya existen en el mundo de la agricultura causados muchas veces por la metodología de producción que tienen muchos

de los palmicultores artesanales; y de esta manera reducir la huella ecológica [40]. Las prácticas agrícolas sostenibles también representan una solución crucial a los desafíos actuales, al proteger los recursos naturales mediante un uso más eficiente de la tierra y el agua [41]. Las prácticas agrícolas sostenibles, como la conservación del suelo, la utilización de pesticidas naturales y la aplicación de fertilizantes orgánicos y compost, están surgiendo como opciones para preservar la productividad de los cultivos mientras se reducen los efectos negativos en el entorno [42]. En consecuencia, su implementación en la agricultura nos orienta hacia una perspectiva más equitativa y sostenible en la producción de alimentos, fomentando la preservación de los recursos naturales y la capacidad de adaptación ante los desafíos ambientales [43]. Por ende, la agricultura sostenible podría contribuir directamente al logro de diversos Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas para el año 2030, tales como: el fin de la pobreza (ODS 1), hambre cero (ODS 2), trabajo decente y crecimiento económico (ODS 8), reducción de desigualdades (ODS 10), producción y consumo responsables, acción por el clima (ODS 13), vida submarina (ODS 14) y vida de ecosistemas terrestres (ODS 15), lo cual implica un impacto positivo tanto a nivel social como ambiental, promoviendo un desarrollo equitativo y sostenible en todo el mundo [42]. Por otro lado, los fertilizantes que se han utilizado en la agricultura en las últimas décadas con el fin de lograr mayor rendimiento en los cultivos son principales los de tipo químico, que generalmente son los que dejan secuelas más notables en la composición del ecosistema, afectando al suelo, aire y agua, por lo que también se han venido implementando fertilizantes biológicos que ofrecen al suelo menos efectos negativos, sino por contrario beneficios [44,45]. Existen fertilizantes según su composición como los de tipo orgánico e inorgánico [46]. Sin embargo, otra clasificación más compleja los agrupa en 5 tipos: simples, mezclas, compuestos, de lenta liberación y subproductos de fertilizantes orgánicos [47].

Lo que se busca con el uso de fertilizantes biológicos de tipo vegetal como los racimos de fruta vacíos no solo es mejorar la producción de la palma aceitera, sino también aportar nutrientes esenciales al suelo agrícola para el desarrollo de los cultivos, por lo que si la palma no es capaz de absorber los nutrientes necesarios para su óptimo desarrollo se verá afectada en términos de productividad [48]. Tal como lo mencionan los autores Alfonso y Torres [49], los fertilizantes suelen aplicarse de manera desigual por lo que indican que la distribución correcta de fertilizante en el área de cultivo dependerá del tamaño granular.

Mientras este sea más grande se tendrá un mayor alcance; sin embargo, también se tiene que tener en consideración aspectos como la conservación de la fertilidad del suelo, el drenaje, conservar los nutrientes y mantener la materia orgánica. Para ello, la palma de aceite tiene las mejores características para crecer en un suelo ácido pero el excesivo uso de fertilizantes inorgánicos deja como consecuencia una sobre acidificación que termina siendo perjudicial para otros organismos del ecosistema, por lo que para optimizar en su uso es necesario utilizar fertilizantes orgánicos [50]. Como alternativa, se puede aprovechar los residuos en forma de biomasa resultantes de la propia producción de la cultivos como la palma aceitera ya que se ha demostrado de manera empírica que usando compost biológico de residuos como racimos de frutos vacíos, se obtienen un crecimiento sustancial sobre las plantaciones de palma a comparación del uso de fertilizantes inorgánicos [51], por otro lado otro estudio realizado por Mite y Espinoza [52], afirma que el factor agua(riego) determina una brecha en la productividad del cultivo de palma aceitera ya que menciona que cultivos sin riego no absorben eficientemente los nutrientes proporcionados por el suelo sin embargo los cultivos que sí fueron regados obtuvieron mejores resultados en generación de frutos, todo ello tomando en cuenta de que las plantaciones se dieron en un lugar donde existe considerable precipitación [52].

Otro de los puntos que nos conducen hacia una producción agrícola más sostenible considera prácticas más sostenibles y una gestión de tierras óptima [53]. Esto ha llevado al surgimiento de la Mesa Redonda sobre Palma Aceitera Sostenible (RSPO), establecida en 2004 para abordar los perjuicios ocasionados por la palma aceitera [54]. La RSPO reúne a diversas partes interesadas, como productores, procesadores, comerciantes de aceite de palma, fabricantes, minoristas, bancos, inversores y organizaciones no gubernamentales, con el fin de reducir los efectos socioambientales negativos [55]. Su certificación busca mejorar la gobernanza y promover prácticas sostenibles en la producción de esta planta [56]. La RSPO establece estándares rigurosos para la sostenibilidad del aceite de palma, incluido el cumplimiento de las leyes y regulaciones nacionales e internacionales [54]. Utiliza una herramienta de auditoría para evaluar el cumplimiento con regulaciones sobre tierras, trabajo y medio ambiente [54].

Otra de las estrategias que existe para lograr la reducción de huella ecológica es el uso de pesticidas biológicos, la palma aceitera como cualquier otro tipo de cultivo está propensa a plagas en cualquier época del año [56]. Generalmente cuando ocurren problemas de

plagas en cultivos como el de la palma aceitera se recurre a la aplicación de pesticidas de tipo químico que son perjudiciales en los cultivos [57]. El hábitat y ambiente donde se desarrolla la palma aceitera cuenta con las características perfectas para el crecimiento de insectos fitófagos por lo que los problemas de índoles entomológica no debería ser una excepción para la palma. Además, los roedores, saprófagos y algunos hongos también pueden representar una amenaza para la palma [57,58,59]. Estos problemas acarrear consecuencias que van desde el bajo rendimiento de producción de la palma hasta el descontrol total del cultivo y la alternativa más adecuada para solucionar este problema es la sustitución de pesticidas químicos por pesticidas naturales compuestos de microorganismos. El nemátodo entomopatógeno *Steinernema carpocapsae*, se presenta como alternativa eficaz contra las plagas, específicamente ataca a una que es muy común en el ámbito de la palma aceitera llamada *Sagalassa valida* [60].

1.6. Justificación

La expansión del cultivo de palma aceitera ha generado preocupaciones alarmantes debido a su impacto ambiental, particularmente en términos de uso de agroquímicos y deforestación [1]. En particular, el uso indiscriminado de agroquímicos en el cultivo de palma aceitera ha sido motivo de preocupación debido a sus efectos negativos en la salud humana y en los ecosistemas naturales, contribuyendo a la contaminación de cuerpos de agua, pérdida de biodiversidad y degradación del suelo [2,28,30,31,32,33]. A pesar de las investigaciones sobre la huella ecológica de diferentes cultivos agrícolas en diversos países del mundo [17,18,19,20,21,24], la literatura existente sobre este tema específico del cultivo de palma aceitera es limitada en el contexto peruano [25,26,27]. Esta brecha en el conocimiento resalta la necesidad de realizar estudios más detallados que aborden los impactos ambientales de la producción de palma aceitera en el Perú, especialmente considerando la expansión acelerada de este cultivo en la Amazonía [7]. Por tanto, el propósito de esta tesis es abordar esta brecha en la investigación mediante la revisión de la huella ecológica del cultivo de palma aceitera en el Perú. Con este fin, se pretende identificar los factores determinantes que contribuyen a esta huella ecológica, como el uso de agroquímicos, la deforestación y el consumo de recursos naturales [28,29,34,35]. Además, se busca evaluar la viabilidad y efectividad de diferentes estrategias para reducir esta huella ecológica, como la implementación de prácticas agrícolas sostenibles y la adopción de certificaciones de sostenibilidad, como la RSPO [40,41,42,43,54].

La importancia de esta tesis radica en su contribución al conocimiento científico sobre el impacto ambiental de la producción de palma aceitera en el Perú y en la formulación de recomendaciones prácticas para mitigar este impacto. Al comprender mejor los factores que contribuyen a la huella ecológica de este cultivo y al identificar estrategias efectivas para reducirla, se puede promover una producción de palma aceitera más sostenible y responsable en el país. Esto no solo beneficiaría al medio ambiente al reducir la deforestación y la contaminación, sino que también tendría implicaciones positivas en términos de desarrollo económico y social, al promover prácticas agrícolas más equitativas y sostenibles [42,43].

II. Pregunta de investigación

¿Cuáles son los factores determinantes que condicionan la adopción de estrategias sostenibles en el cultivo de palma aceitera y qué alternativas podrían aplicarse para reducir su huella ecológica en el Perú?

III. Objetivos

3.1. Objetivo General

Analizar los factores determinantes que condicionan la adopción de estrategias sostenibles en el cultivo de palma aceitera, con el fin de proponer alternativas orientadas a reducir su huella ecológica en el Perú.

3.2. Objetivos Específicos

- Analizar estrategias documentadas a nivel internacional para reducir la huella ecológica del cultivo de palma aceitera, mediante estudios de caso.
- Identificar factores determinantes en la adopción de estrategias eficientes para reducir la huella ecológica del cultivo de palma aceitera en Perú, utilizando indicadores como huella de carbono, hídrica, energética y uso de la tierra.

- Comparar factores determinantes que influyen en la adopción de estrategias de reducción mediante visualizaciones gráficas de los indicadores para facilitar la interpretación de los resultados.

IV. Metodología

4.1. Tipo de estudio

La revisión sistemática, aunque es considerada un estudio secundario, puede alinearse con dos enfoques específicos: el descriptivo y el analítico [61]. Por un lado, se consideró como un enfoque descriptivo, debido a la necesidad de proporcionar una visión integral y detallada del estado actual del conocimiento sobre la huella ecológica del cultivo de palma aceitera en Perú. Este tipo de estudio fue fundamental para establecer una base sólida de información que incluya las características y condiciones del cultivo de palma aceitera, los impactos ambientales asociados y las estrategias actualmente implementadas para reducir su huella ecológica. Al describir detalladamente estos aspectos, la investigación permitió comprender las condiciones específicas del contexto peruano y cómo estas se comparan con situaciones similares en otros países. Este enfoque descriptivo fue esencial para cumplir con los objetivos específicos de determinar las estrategias utilizadas y comparar los factores determinantes en la reducción de la huella ecológica, proporcionando una base clara y detallada sobre la cual se puede construir un análisis más profundo.

Por otro lado, también correspondió al enfoque analítico, debido a la necesidad de ir más allá de la simple descripción y proporcionar una evaluación crítica de los datos recopilados. La tesis no solo buscó identificar y documentar los factores determinantes y las estrategias de reducción de la huella ecológica del cultivo de palma aceitera, sino también analizar cómo estos factores interactúan y cuál es la efectividad de las estrategias en el contexto peruano. Este análisis implicó comparar estudios y datos, identificar patrones y tendencias, y evaluar la calidad y relevancia de la evidencia disponible. Al adoptar un enfoque analítico, el estudio ofreció percepciones valiosas y recomendaciones prácticas para mejorar la sostenibilidad del cultivo de palma aceitera en Perú. Este enfoque fue crucial para responder de manera detallada a la pregunta de investigación y alcanzar los objetivos planteados, proporcionando una evaluación profunda y crítica que

pueda informar la toma de decisiones y la implementación de estrategias efectivas en la reducción de la huella ecológica.

4.2. Área de estudio

La investigación realizada incluyó una revisión sistemática de estudios a nivel global con el propósito de identificar prácticas sostenibles aplicadas en el cultivo de palma aceitera. No obstante, el análisis se centró en el contexto peruano, con el objetivo de evaluar la aplicabilidad de estas estrategias internacionales en las zonas productoras del país, las cuales abarcan 95,134.2 hectáreas hasta el año 2020, distribuidas en los siguientes departamentos: Loreto (11% de la producción), situado en la zona nororiental de Perú, con una extensión de 368,852 km² y coordenadas de 00°02'37" S y 75°10'29" O; San Martín (48%), ubicado en la región nororiental y mayormente en la selva alta, destacando la Cordillera Azul en su zona oriental, con coordenadas de 14°58'18" S y 74°38'41" O; Huánuco (5%), que presenta una geografía diversa con sierra y selva alta, incluyendo la Cordillera de Huayhuash y el flanco oriental de los Andes, con coordenadas de 10°28'56" S y 76°43'18" O; y Ucayali (36%), localizado en la parte centro-oriental del Perú, en la zona de selva, con coordenadas de 8°40'19" S y 75°58'08" O [1,62,63,64,65]. Estos departamentos se pueden observar en la **figura 1**.

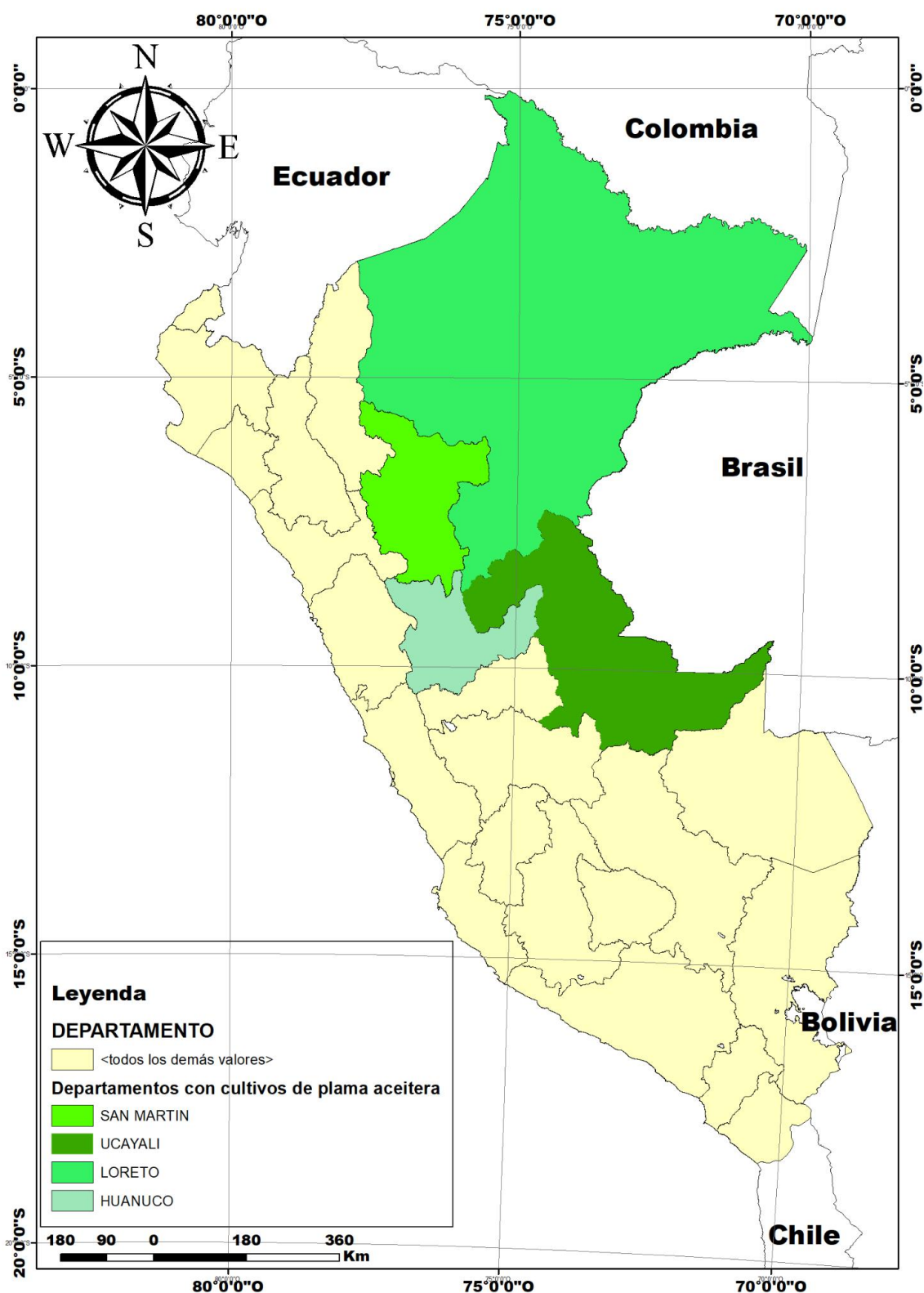


Figura 1: Mapa de la zona de producción del cultivo de palma aceitera en el Perú, representado con colores según la intensidad de producción. En la leyenda, el verde intenso indica el departamento de San Martín, que tiene la mayor producción de palma aceitera, mientras que el verde claro representa el departamento de Huánuco, con la menor productividad [1].

4.3. Actividades

Metodología

Revisión sistemática

Se realizó la búsqueda de artículos o documentos sobre el tema en los motores de búsqueda científicos ScienceDirect, así como en las bases de datos Scielo y Scopus. También se utilizó Google Scholar para la búsqueda de artículos tanto indexados como también literatura gris, así mismo se usaron informes y documentación física proveniente de bibliotecas especializadas (Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, Ministerio del ambiente, entre otras). Para llevar a cabo la búsqueda, se generó una estrategia de búsqueda orientada a identificar publicaciones científicas que proporcionen información sobre la huella ecológica del cultivo de la palma aceitera. Los términos utilizados en la búsqueda incluirán "palm oil", "oil palm", "ecological footprint", "*Elaeis guineensis*", "palma africana", "sustainability", "environmental impact", "agriculture", "crop production", "cultivation", y "plantation". Estos términos fueron combinados en inglés y en español utilizando operadores booleanos (AND / OR), lo que permitió delimitar los resultados a investigaciones directamente asociadas con el cultivo de palma aceitera y sus impactos ambientales.

La cadena de búsqueda aplicada fue la siguiente:

- ("*Elaeis guineensis*" OR "palma aceitera" OR "aceite de palma" OR "palma africana") AND ("huella ecológica" OR "impacto ambiental" OR "environmental footprint" OR "ecological footprint" OR "huella ambiental") AND ("sustainability" OR "reduction" OR "mitigation" OR "crop").

Esta cadena se aplicó en cada uno de los motores de búsqueda, con el fin de localizar estudios que abordan de manera conjunta el cultivo de palma aceitera y su vínculo con indicadores de sostenibilidad ambiental, especialmente la huella ecológica. En algunos casos, se realizaron adecuaciones menores en los conectores booleanos o en el idioma, según las funcionalidades y filtros disponibles de cada plataforma de búsqueda utilizada.

Para la gestión de las referencias, se utilizó el aplicativo informático Mendeley, donde se registraron todas las referencias encontradas. El registro de las referencias del total de artículos que se consideró para la revisión sistemática se filtró mediante la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) [66], tal como se ilustra en la **figura 2**, utilizando la aplicación informática Rayyan [67].

Modelo de revisión sistemática

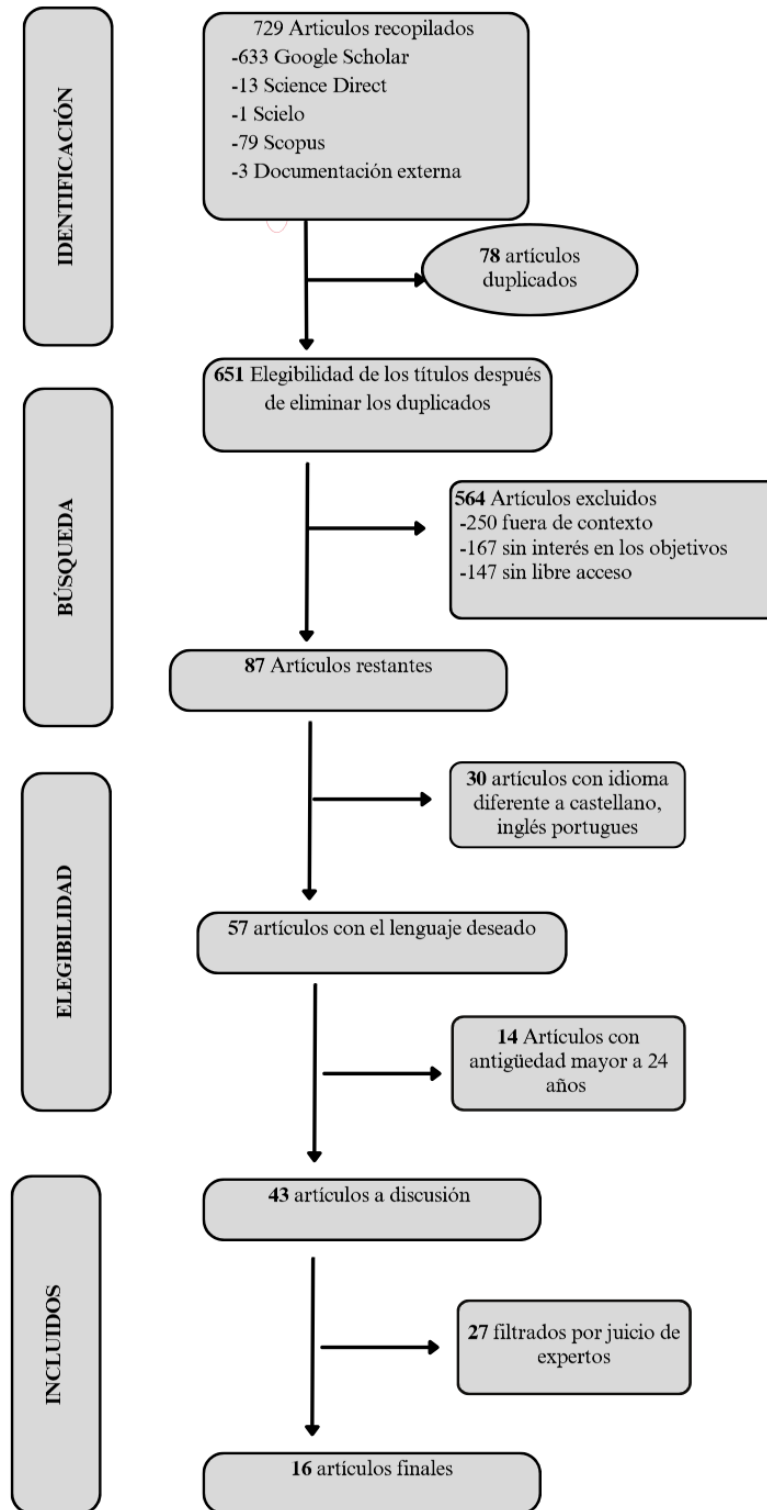


Figura 2: Diagrama PRISMA [68]

En la fase de identificación se recopiló bibliografía a través de diversas bases de datos científicas. De ello se obtuvo un total de 729 artículos específicamente en Google Scholar (633), Science Direct (13), Scielo (1) y Scopus (79), a lo que se añadieron 3 documentos externos. Una vez concluida la identificación y búsqueda preliminar, nos apoyamos del aplicativo Mendeley, con el fin de ordenar y gestionar las referencias bibliográficas, así como en la herramienta Rayyan, un aplicativo muy útil en la depuración y gestión de artículos científicos en revisiones sistemáticas que nos permitió obtener 43 artículos pertinentes. Posteriormente en etapa del proceso de selección, se llevó a cabo un juicio de expertos, que consistió en una revisión crítica independiente realizada por los tesisistas (M.L.F) y (E.B.C), junto con el asesor de tesis (M.H.M). Los artículos fueron evaluados aplicando criterios enfocados en la relevancia de la información relacionada con el cultivo de palma aceitera, con especial atención en estrategias de reducción, huella ecológica y otros temas relacionados, desarrollados en diferentes países del mundo. Esta evaluación permitió clasificar y organizar los estudios de forma sistemática. Tras la revisión individual, se sostuvo una reunión conjunta para discutir los resultados y resolver las discrepancias encontradas en la selección preliminar de los artículos. A partir de este intercambio, se definieron por consenso los estudios más pertinentes para los objetivos de la investigación. Como resultado, se excluyeron 27 artículos adicionales, quedando finalmente 16 estudios seleccionados para ser incluidos en la revisión sistemática, los cuales se detallan en el **Anexo 1**.

El diagrama PRISMA fue fundamental para compilar información valiosa durante la revisión sistemática inicial del proyecto. Este proceso nos permitió identificar y seleccionar estudios relevantes sobre la huella ecológica del cultivo de palma aceitera en Perú. Posteriormente, se realizó un análisis de casos estratégicos para determinar las mejores estrategias de reducción de la huella ecológica de la palma aceitera, cumpliendo así con el primer objetivo específico. En esta etapa, hemos seleccionado y evaluado estudios de casos que implementen prácticas sostenibles y eficientes, extrayendo datos clave sobre las estrategias utilizadas. Para lograr el segundo objetivo específico, se llevó a cabo un análisis de la eficiencia de las estrategias mediante un enfoque descriptivo. Se recopilaron datos cualitativos de la reducción de huella ecológica, utilizando indicadores como la huella de carbono, huella hídrica, huella energética y uso de la tierra. Además,

se realizó un análisis comparativo para examinar la eficiencia de las diferentes estrategias seleccionadas. Este análisis nos permitió identificar las prácticas más efectivas y sus impactos en la reducción de la huella ecológica. Finalmente, para cumplir con el tercer objetivo específico, se visualizó la intensidad de la reducción de los diferentes indicadores de huella mediante la interpretación y síntesis de los hallazgos. Se utilizaron herramientas de visualización de datos para identificar patrones y relaciones, facilitando así su análisis y comprensión. Estas visualizaciones permitieron comunicar de manera clara y efectiva los resultados, apoyando la toma de decisiones y la formulación de recomendaciones para mejorar la sostenibilidad del cultivo de palma aceitera en Perú.

4.4. Análisis de información

4.4.1. Operacionalización de variables

El presente estudio se enfocó en evaluar los factores determinantes que influyen en la huella ecológica del cultivo de la palma aceitera. Para lograrlo, se identificaron cinco variables independientes clave: la huella de carbono, la huella hídrica, la huella energética, el uso de la tierra y el uso de agroquímicos, tal como se detalla en la **tabla 1**. Estas variables fueron seleccionadas por su relevancia directa en el impacto ambiental del cultivo y su influencia en la huella ecológica. La huella ecológica, definida como la variable dependiente principal, representó el impacto ambiental total del cultivo de palma aceitera. Dado que el análisis se basa en una evaluación cualitativa, los factores de producción fueron categorizados en rangos de impacto ambiental. Esta categorización permitió obtener una comprensión clara y detallada de la sostenibilidad ambiental del cultivo de palma aceitera a través de la clasificación de los indicadores asociados a estas variables independientes.

Tabla 1: Identificación de variables clave como factores determinantes de la huella ecológica en el cultivo de palma aceitera

| Variable | Tipo de variable | Definición conceptual | Definición operacional | Indicadores | Tipo y escala | Rango |
|---------------------|------------------|---|---|--|------------------------|---|
| Huella ecológica | Dependiente | Indicador de sostenibilidad ambiental que abarca individuos, su entorno, recursos naturales consumidos y desechos generados [10]. | Medición agregada de los indicadores de huella de carbono, hídrica, energética y uso de tierra. | Huella de carbono, huella hídrica, huella energética, uso de tierra, uso de agroquímicos | Cuantitativa, continua | hectáreas globales (gha) |
| Huella de carbono | Independiente | La medida del impacto de todos los gases de efecto invernadero producidos por muestras actividades [69]. | Medición de emisiones de CO ₂ equivalente (CO ₂ e) generado por el cultivo. | CO ₂ e (toneladas) | Cualitativa, ordinal | Expresada en t/ha Baja Media Alta |
| Huella hídrica | Independiente | Indicador con el objetivo de cuantificar el contenido virtual de agua en productos y/o servicios [70]. | Medición del consumo de agua en metros cúbicos por hectárea cultivada. | m ³ | Cualitativa, ordinal | Expresada en m ³ /ha Baja Media Alta |
| Huella energética | Independiente | Indicador que comprende el total de energía consumida en la producción de un bien [71]. | Medición del consumo de energía en kilovatios hora (kWh) por hectárea | kWh | Cualitativa, ordinal | Expresada en kWh/ha Baja Media Alta |
| Uso de tierra | Independiente | Superficie de tierra para el cultivo [72]. | Medición del área cultivada en hectáreas. | ha | Cualitativa, ordinal | Expresada en ha Baja Media Alta |
| Uso de agroquímicos | Independiente | Cantidad de sustancias químicas utilizados en la agricultura [73]. | Medición de la cantidad de agroquímicos utilizados en kilogramos por hectárea. | kg/ha | Cualitativa, ordinal | Expresada en kg/ha Baja Media Alta |

4.4.2. Metodología para el análisis de casos

Para llevar a cabo el análisis de casos según la metodología PRISMA, se inició identificando estudios relevantes sobre prácticas sostenibles en plantaciones de palma aceitera implementadas tanto a nivel global como en determinadas zonas del Perú. La búsqueda se realizó mediante criterios específicos en bases de datos científicas especializadas, estableciendo criterios de inclusión y exclusión que aseguran la disponibilidad de datos completos sobre huella ecológica y prácticas ambientales de cada caso seleccionado. A partir de esta selección, se extrajeron datos detallados como las medidas de huella de carbono, huella hídrica, huella energética y uso de la tierra.

Para evaluar la aplicabilidad de estas estrategias en el contexto peruano, se utilizó información proveniente de estudios de caso implementados en otros países y también en determinadas zonas del Perú, además de informes técnicos, publicaciones académicas y reportes institucionales vinculados al cultivo de palma aceitera. En este proceso, se revisaron antecedentes desarrollados específicamente en los departamentos de Ucayali, San Martín, Loreto y Huánuco, a partir de documentos elaborados por entidades del

estado y organizaciones del sector. Adicionalmente, con el propósito de comparar de forma objetiva la viabilidad de implementación de estas estrategias, también se consideraron aspectos relacionados con el costo y la facilidad de implementación de las estrategias analizadas. Los costos de implementación se clasificaron como bajo, moderado o alto, dependiendo de la cantidad de recursos operativos necesarios, infraestructura requerida y personal especializado involucrado. Asimismo, la facilidad de implementación se evaluó y clasificó en las mismas categorías, considerando factores como el tiempo requerido para llevar a cabo la estrategia, la necesidad de capacitación del personal y la utilización de tecnologías adicionales. Estos datos se sintetizaron utilizando tablas para facilitar la comparación y evaluación de las estrategias implementadas, como se presenta en la **tabla 2**.

Una vez completada esta fase, se realizó un análisis crítico de los resultados obtenidos, identificando patrones comunes y diferencias relevantes en las estrategias implementadas. Este análisis se presentó de manera clara y estructurada para informar futuras prácticas en el cultivo. El análisis se adaptó según la disponibilidad y naturaleza de los datos obtenidos durante la revisión sistemática. Esto implicó una evaluación detallada de las prácticas agrícolas y tecnológicas descritas en los estudios seleccionados, así como de las condiciones ambientales y sociales específicas de cada caso. La comparación entre diferentes casos se basó en la identificación de patrones comunes y diferencias notables en las estrategias implementadas. Este enfoque permitió determinar la eficiencia relativa de las estrategias en términos de sostenibilidad ambiental, asegurando que el análisis sea coherente y detallado en función de la información disponible.

Tabla 2: Criterios de Evaluación de Costos y Facilidad de Implementación de Estrategias para la Sostenibilidad en el Cultivo de Palma Aceitera

| | Bajo | Moderado | Alto |
|------------------------------------|--|--|--|
| Costo de implementación | Estas estrategias requieren únicamente gastos operativos básicos, como el uso de herramientas disponibles al alcance y el tiempo de los trabajadores, lo que permite su implementación sin la necesidad de adquirir recursos adicionales significativos. | Estas estrategias demandan la asignación de recursos para la capacitación del personal, la implementación de tecnologías intermedias y la incorporación de herramientas que requieren algún nivel de inversión, lo que incrementa los gastos operativos y de mantenimiento. | Estas estrategias necesitan una inversión considerable en infraestructura y servicios técnicos, así como gastos recurrentes asociados al personal especializado y a la supervisión continua para garantizar su eficacia. Esto puede incluir la necesidad de monitoreo constante y mantenimiento de sistemas complejos, lo que puede generar costos significativos a largo plazo. |
| Facilidad de implementación | Estrategias que exigen formación técnica avanzada, equipos especializados y asesoría profesional para el control y seguimiento de las prácticas, con supervisión constante para asegurar el cumplimiento de los objetivos de cultivo y sostenibilidad. | Exige que los palmicultores complementen formación introductoria en prácticas técnicas específicas, cuya duración puede ser de pocas semanas. <hr/> Requiere la incorporación de equipos o insumos adicionales poco comunes en el entorno estándar de producción, cuya adquisición e instalación pueden extenderse entre uno y tres meses. <hr/> Necesita revisión y adaptaciones periódicas en intervalos de uno a dos meses, en función de factores ambientales, para asegurar la sostenibilidad de la estrategia. | Estrategias que no requieren formación técnica específica y pueden ser ejecutadas utilizando herramientas y conocimientos que los palmicultores ya poseen, como el uso de materiales tradicionales a su alcance. |

4.4.3. Herramientas y software utilizados para el análisis y obtención de resultados

Utilizamos herramientas y software especializados para el análisis de la información en nuestra tesis. Para la gestión bibliográfica y manejo de referencias, empleamos Mendeley, un gestor que nos permitió organizar y exportar las referencias compiladas hacia Rayyan. En Rayyan, eliminamos duplicados y seleccionamos artículos relevantes de manera ciega, asegurando una revisión imparcial y sistemática. Una vez seleccionados los artículos, evaluamos individualmente su relevancia, y Rayyan consolidó estas evaluaciones para determinar la inclusión final en el estudio. Para cumplir con el Objetivo 1, utilizamos Mendeley y Rayyan para identificar y seleccionar estudios de casos relevantes. Este proceso garantizó que nuestra revisión sistemática incluyera las mejores prácticas y estrategias actuales para la reducción de la huella ecológica. La revisión sistemática nos proporcionó una base sólida de información sobre las estrategias utilizadas, esencial para el análisis de casos.

Para abordar el Objetivo 2, se definieron como factores determinantes aquellos elementos que influyen directamente en la adopción e implementación de las estrategias sostenibles por parte de los productores de palma aceitera, considerando el contexto peruano. Estos factores fueron evaluados cualitativamente a partir de la evidencia recolectada durante la revisión sistemática, evaluada mediante Excel, considerando indicadores: huella de carbono, huella hídrica, huella energética, uso de tierra y uso de agroquímicos. Los factores determinantes se agruparon en cinco categorías: factores sociales, que hacen referencia al grado de participación, aceptación y colaboración de las comunidades sociales y los palmicultores en la implementación de estrategias sostenibles. Incluyen aspectos como el involucramiento comunitario, la percepción social de las prácticas agrícolas y costumbres específicas o locales [74]; factores tecnológicos, que se refieren al acceso y disponibilidad de tecnologías pertinentes, incluyendo herramientas, infraestructura, equipos especializados y sistemas de monitoreo necesarios para aplicar las estrategias planteadas en este estudio [75]; factores económicos, que abarcan los costos asociados a la implementación de estrategias de reducción, incluyendo gastos iniciales, mantenimiento, retorno de inversión y acceso a financiamiento [76]; factores educativos, que contemplan el nivel de formación técnica, capacitación y conocimiento de los productores sobre prácticas sostenibles y sus beneficios ambientales [77]; y factores ambientales, relacionados con las condiciones ecológicas del entorno, como la

calidad del suelo, la disponibilidad de agua, la biodiversidad y la presencia de ecosistemas [78]. Estas definiciones proporcionan una comprensión cualitativa e integral de los datos recopilados. A partir de esta evaluación, las estrategias más eficientes fueron clasificadas según el grado de influencia de los factores en la toma de decisiones de los palmicultores. Para ello, se utilizó una escala de tres categorías: alta correspondencia (AC), baja correspondencia (BC) y no determinado (N/D). La decisión de emplear únicamente estos tres niveles responde al enfoque cualitativo de la revisión, que priorizó la identificación de vínculos documentados entre cada factor y la implementación de estrategias sostenibles. Se descartó la inclusión de un nivel intermedio para evitar ambigüedades metodológicas, ya que gran parte de la literatura revisada no proporciona una gradación cuantitativa de dicha influencia.. Se consideró que un factor tenía alta correspondencia (AC) cuando al menos dos estudios revisados vinculan explícitamente dicho factor con la implementación o el éxito de una estrategia de reducción, describiendo mecanismos o resultados concretos. Se asignó baja correspondencia (BC) cuando no se identificó en la literatura una relación directa o mención relevante del factor en relación con la estrategia evaluada. Finalmente, se clasificó como no determinado (N/D) en los casos donde no se encontraron estudios que confirmen o descarten su influencia.

La clasificación detallada de estas categorías se presenta en la **tabla 3**. Finalmente, para el Objetivo 3, utilizamos Excel para la visualización de datos. Creamos gráficos y visualizaciones que facilitaron la comparación de los diferentes factores determinantes y la eficiencia de las estrategias de reducción. Estas visualizaciones ayudaron a identificar patrones y relaciones clave, permitiendo una comunicación clara y efectiva de los resultados.

Tabla 3: Escala de clasificación del grado de influencia en la adopción de estrategias de reducción en el cultivo de Palma Aceitera

| Grado de Influencia | | |
|----------------------------|-----------------------------|--|
| AC | Alta correspondencia | Cuando como mínimo dos estudios relacionan explícitamente dicho factor con la adopción de una estrategia de reducción. |
| BC | Baja correspondencia | Indica que no se encontró relación directa en la revisión (no afecta). |
| N/D | No determinado | No asegura que influye sin embargo tampoco afirma que no influye |

V. Resultados

5.1. Análisis de las estrategias sostenibles en la reducción de la huella ecológica de la Palma Aceitera

Dentro del análisis de estrategias de reducción, se destaca la Certificación RSPO (Mesa Redonda), la cual asegura que la producción cumpla con estándares globales de sostenibilidad [79,80,85,87,90]. Además, el uso de biocarbón actúa como un almacén de carbono, mejora la salud del suelo y reduce los gases de efecto invernadero, lo que resulta en una disminución de la huella de carbono e hídrica [81,82,83]. Por otro lado, el manejo integrado de la fertilidad del suelo (GISF) consiste en utilizar una combinación de biofertilizantes y otros fertilizantes para mejorar la fertilidad del suelo, lo que reduce el uso de agroquímicos y también contribuye a la disminución de la huella de carbono [84]. Otra estrategia interesante es el uso de microbiomas en el cultivo, que implementa inoculantes microbianos para mejorar la salud del suelo; sin embargo, esta opción presenta el riesgo de proliferación de microorganismos patógenos si no se maneja adecuadamente [86]. En síntesis, las estrategias presentadas en la **tabla 4** se centran en la optimización del uso de recursos, la mejora de la salud del suelo y la reducción de la huella ecológica, principalmente la de carbono e hídrica. Cada estrategia presenta beneficios específicos en términos de reducción, lo que indica que la selección de la más adecuada dependerá de las condiciones particulares y de los objetivos de sostenibilidad de los productores. Por lo tanto, los factores determinantes serán los que orienten la adopción o el rechazo de estas estrategias. Además, la combinación de estrategias como proteger el suelo cubierto con leguminosas rastreras, promover la siembra de nuevas áreas de palma aceitera en zonas ya intervenidas y utilizar los racimos de fruta vacíos (RFV) como abono (mulch) ha demostrado generar resultados positivos, logrando una reducción de la huella ecológica de hasta un 85 % por año, según un estudio realizado en el departamento de Ucayali. Esta reducción se debe principalmente a la conservación de los

bosques, el aumento del carbono en el suelo y la menor dependencia de fertilizantes sintéticos, lo que refuerza su efectividad para mitigar impactos ambientales del cultivo de palma aceitera [94]. Asimismo, el aprovechamiento de otros subproductos generados en el proceso de extracción también ha mostrado potencial como estrategia sostenible, como es el caso de la aplicación de lodos provenientes de las lagunas de oxidación, que tratan las aguas residuales de las plantas de extracción de palma aceitera, se presenta como una alternativa viable debido a su alto contenido de nutrientes y materia orgánica, lo cual contribuye a mejorar la fertilidad y estructura del suelo [91]. Si bien uno de los principales desafíos en estos sistemas es la acumulación de lodos, se han implementado tecnologías como los geotubos para facilitar su extracción y deshidratación [95]. Aunque en este proceso se utilizan floculantes para ayudar en la separación de sólidos, análisis realizados demostraron que los lodos no presentan características peligrosas y que su composición química no se ve alterada en gran medida, lo que permite su uso seguro como abono orgánico en las plantaciones de palma aceitera [95,96]. Sin embargo, la implementación efectiva de estas estrategias dependerá de factores como los costos iniciales, el nivel de conocimiento técnico de los productores y la disponibilidad de recursos para el manejo adecuado de cada práctica agrícola sostenible.

Asimismo como complemento a las estrategias previamente mencionadas, se identificaron técnicas emergentes de regeneración de suelos que aún no han sido suficientemente aplicadas en las plantaciones de palma aceitera en el Perú, como el uso de humus de lombriz. Este biofertilizante, utilizado en forma sólida y líquida, ha demostrado mejorar la estructura del suelo, la retención de humedad y la disponibilidad de nutrientes esenciales, promoviendo un entorno favorable para el desarrollo de las plántulas [97]. En la etapa de vivero, la combinación del humus sólido con su extracto líquido, en proporciones adecuadas, mostró resultados óptimos en el crecimiento inicial, facilitando una mejor adaptación al campo [98]. Además, se evidenció que el aumento progresivo en las dosis de vermicompost permite mantener niveles elevados de nitrógeno y una mayor biomasa en las plántulas, lo que resalta su potencial como alternativa sostenible frente al uso de fertilizantes sintéticos convencionales [99].

Tabla 4: Análisis de las estrategias sostenibles en la reducción de la huella ecológica de la Palma Aceitera

| Estrategia | Descripción | Costo de implementación * | Facilidad de implementación * | Efectos secundarios | Referencias |
|--|---|----------------------------------|--------------------------------------|---|----------------------|
| RSPO Certificación de la Mesa Redonda | Desarrollo de certificaciones para asegurar que la producción de palma aceitera se alinee con estándares globales de sostenibilidad. Estas certificaciones buscan minimizar el impacto ambiental y social de la producción. | Moderado | Moderado | Puede generar costos adicionales para los productores. | [79][80][85][87][90] |
| Uso de biocarbón | Es un material rico en carbono obtenido mediante la pirólisis de biomasa que se utiliza para mejorar la salud del suelo y mitigar el cambio climático. Actúa como un almacenamiento de carbono a largo plazo, reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero como CO_2 , metano y óxido nítrico. Además, mejora la retención de agua y nutrientes en los suelos agrícolas, aumenta los rendimientos de los cultivos y ayuda a combatir la contaminación por microplásticos y metales pesados. | Alto | Moderado | Puede liberar compuestos tóxicos si no se produce adecuadamente | [81][82][83] |
| El manejo integrado de la fertilidad del suelo (GISF) | Consiste en combinar inóculos microbianos (biofertilizantes), fertilizantes inorgánicos y orgánicos para mejorar la fertilidad del suelo, aumentar el secuestro de carbono y reducir las emisiones de CO_2 en cultivos frutales. | Moderado | Moderado | Puede aumentar el consumo energético debido a la producción y transporte de biofertilizantes. | [84] |
| Uso de microbioma en el cultivo | Implementación de inoculantes microbianos para mejorar la salud del suelo y la productividad de la palma aceitera. | Moderado | Moderado | Posible aumento de algunos microorganismos patógenos si no se manejan adecuadamente. | [86] |
| Uso eficiente de fertilizantes nitrogenados | Ajuste de la dosis de fertilizantes N según la respuesta del suelo y la planta para maximizar el rendimiento sin exceder las necesidades nutricionales del cultivo. | Moderado | Moderado | El uso ineficiente de fertilizantes podría incrementar el uso de agua y reducir los rendimientos si no se maneja adecuadamente. | [88][89] |

| | | | | | |
|--|---|----------|----------|---|----------|
| La aplicación de lodos de los efluentes de las lagunas de oxidación | La aplicación de lodos provenientes de los efluentes de las lagunas de oxidación, que tratan las aguas residuales de las plantas de extracción de palma aceitera, es beneficiosa debido a su alto contenido de nutrientes y elevada concentración de materia orgánica. Estos lodos contribuyen de manera considerable a la mejora de las propiedades físicas del suelo, favoreciendo su estructura y fertilidad. | Moderado | Moderado | Posible contaminación si los lodos no son tratados adecuadamente. | [91] |
| Proteger el suelo cubierto con leguminosas rastreras | Proteger el suelo en cultivos de palma aceitera enriquece su calidad biológica y nutricional. Estas leguminosas, al formar una relación simbiótica con bacterias del género <i>Rhizobium</i> , fijan nitrógeno atmosférico, actuando como "almacenes" de nitrógeno y sirviendo como abono verde. Esto aumenta la disponibilidad de nitrógeno para las plantas y reduce la dependencia de fertilizantes sintéticos, disminuyendo así las emisiones de carbono asociadas a su producción. | Bajo | Alto | Puede requerir manejo específico para evitar competiciones con el cultivo. | [92][94] |
| Dosificar y programar las aplicaciones de fertilizantes | Aplicar la dosis, fuentes, épocas y formas de aplicación de fertilizantes en función de los resultados del clima, la topografía local y los análisis de suelos es esencial para optimizar el uso de nutrientes. Este enfoque permite ajustar las aplicaciones a las necesidades específicas de los cultivos, asegurando que reciban los nutrientes necesarios en el momento adecuado y de la manera más eficiente posible. | Moderado | Bajo | Requiere un monitoreo constante y conocimiento técnico para su efectividad. | [91] |
| Fitosanitario | Las prácticas agronómicas para la palma de aceite se centran en un manejo nutricional balanceado, un uso eficiente del agua y el control de plagas. Un registro de las etapas del cultivo permite mejorar las prácticas agrícolas. | Moderado | Moderado | Puede ser costoso en tiempo y recursos para el registro y monitoreo. | [93] |
| Manejo nutricional del cultivo de palma de aceite | La cosecha de frutos de palma de aceite extrae nutrientes del suelo, por lo que es esencial reponerlos para evitar el empobrecimiento del suelo y la disminución de la productividad. Para una fertilización efectiva, es fundamental identificar los niveles críticos de nutrientes en el suelo y en el tejido foliar, garantizando un balance adecuado con las condiciones nutricionales del cultivo. | Moderado | Moderado | Puede resultar en un costo elevado si no se gestiona adecuadamente. | [93] |

| | | | | | |
|--|---|----------|----------|--|------|
| Riego por goteo | Es un sistema muy eficiente, con una eficacia que varía entre el 75% y el 95%. Este método suministra a la palma de aceite la cantidad precisa de agua en el momento adecuado y permite la aplicación simultánea de fertilizantes. Aunque ofrece beneficios similares al riego por aspersión, requiere supervisión constante. | Alto | Moderado | Requiere supervisión constante para mantener la eficacia. | [93] |
| Promover la siembra de nuevas áreas de palma de aceite en zonas ya intervenidas | En el cultivo de palma, la prevención de la deforestación y la promoción de nuevas plantaciones en terrenos degradados contribuyen de manera relevante a la reducción de emisiones. | Moderado | Moderado | Puede enfrentar oposición de comunidades locales o requerir inversiones iniciales. | [94] |
| Uso de los racimos de fruta vacíos (RFV) como abono (mulch) | En el cultivo de palma de aceite controla malezas y mejora la retención de humedad. Estos residuos, que representan el 20-23% del peso del aceite, son ricos en nutrientes (0,95% N, 0,27% P, 2,11% K y 0,33% Ca). En áreas con escasez de agua, su aplicación alrededor de las plantas ayuda a conservar humedad y mejora las propiedades del suelo. | Bajo | Moderado | Podría atraer plagas si no se gestiona adecuadamente. | [94] |

* Los criterios de evaluación de Costo de implementación y Facilidad de implementación utilizados en esta tabla se explican en detalle en la **tabla 3**.

5.2. Clasificación de la eficiencia de estrategias sostenibles en la reducción de la huella ecológica de la Palma Aceitera

La **tabla 5** presenta la clasificación de las estrategias sostenibles aplicadas en el cultivo de palma aceitera, enfocándose en su efectividad para reducir la huella ecológica de los cuales se conforman por los indicadores huella de carbono, hídrica y energética, así como el uso de tierra y agroquímicos. Cada estrategia se evalúa en función de su impacto en estas dimensiones, destacando que la Certificación RSPO no aplica en términos de reducción de huella ecológica. Sin embargo, otras prácticas como el uso de biocarbón, el manejo integrado de la fertilidad del suelo (GISF), y el uso de microbiomas muestran resultados positivos en la disminución tanto de la huella de carbono como de la hídrica, lo que sugiere su relevancia en la búsqueda de sostenibilidad [81,82,83,84,86]. Asimismo, la protección del suelo mediante leguminosas rastreras y la utilización de los racimos de fruta vacíos (RFV) como abono (mulch) revelan un potencial notable para optimizar el uso de recursos y reducir el impacto ambiental del cultivo [92,94]. Por otro lado, estrategias como el uso eficiente de fertilizantes nitrogenados y la aplicación de lodos de efluentes, aunque pueden contribuir a la reducción de la huella energética, presentan desafíos en su implementación [88,89,91]. Este enfoque cualitativo resalta la importancia de considerar tanto los beneficios ambientales como las condiciones de aplicación de cada estrategia para alcanzar una producción más sostenible en el sector de la palma aceitera.

Tabla 5: Clasificación de la eficiencia de estrategias sostenibles en la reducción de la huella ecológica de la Palma Aceitera

| Estrategias | Reducción | | | | Referencias |
|---|-------------------|----------------|-------------------|---------------|--------------|
| | Huella de carbono | Huella hídrica | Huella energética | Uso de tierra | |
| RSPO | | | | | [79][80] |
| Certificación de la Mesa Redonda | | | No aplica | | [85][87][90] |
| Uso de biocarbón | x | x | | | [81][82][83] |
| El manejo integrado de la fertilidad del suelo (GISF) | x | | | | [84] |
| Uso de microbioma en el cultivo | x | x | | | [86] |
| Uso eficiente de fertilizantes nitrogenados | | | | | [88][89] |
| La aplicación de lodos de los efluentes de las lagunas de oxidación | | | | | [91] |
| Proteger el suelo cubierto con leguminosas rastreras | x | | x | | [92][94] |
| Dosificar y programar las aplicaciones de fertilizantes | | | | | [91] |
| Fitosanitario | x | | | | [93] |
| Manejo nutricional del | x | | x | | [93] |

| | | | | | |
|--|---|---|---|---|--------|
| cultivo de palma de aceite | | | | | |
| Riego por goteo | | x | | | [93] |
| Promover la siembra de nuevas áreas de palma de aceite en zonas ya intervenidas | | | | x | [94] |
| Uso de los racimos de fruta vacíos (RFV) como abono (mulch) | x | | x | | x [94] |

Una vez clasificadas, las estrategias de reducción más eficientes, que cumplen con más indicadores de sostenibilidad, se presentan en la **tabla 6**. Estas estrategias fueron evaluadas y ordenadas según una escala de influencia en la toma de decisiones de los palmicultores para su implementación. La escala incluye tres categorías: alta correspondencia (AC) , que indica un impacto directo en la decisión de adopción; baja correspondencia (BC) , que sugiere que no influye en la estrategia y no determinado (N/D) lo que significa que no existen estudios que demuestran su influencia en la adopción de estrategias eficientes, como se presenta en la **tabla 3**. Posteriormente, se analizaron los factores determinantes de implementación entre los palmicultores, clasificándolos en factores sociales, tecnológicos, económicos, educativos y ambientales. En este análisis, el uso de biocarbón mostró una influencia marcada en cuatro factores: social, tecnológico, económico y educativo [81,82,83,100]. Por su parte, el uso de microbioma en el cultivo también tuvo una importancia notable en los mismos factores, con la diferencia de que impactó en el factor ambiental en lugar del social [86]. La estrategia de proteger el suelo con leguminosas rastreras evidenció un efecto principalmente en el factor educativo, mientras que el uso de racimos de frutas vacíos (RFV) como abono (mulch) influyó en los factores sociales y educativos [92,94]. Finalmente, la promoción de nuevas áreas de palma aceitera en zonas intervenidas impactó en el factor social, tecnológico y ambiental [94].

Tabla 6: Clasificación de estrategias eficientes de reducción en el cultivo de Palma Aceitera según factores determinantes de influencia

| Estrategias | Factor social | Factor tecnológico | Factor económico | Factor educativo | Factor ambiental | Referencias |
|--|----------------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------|
| Uso del biocarbón | AC | AC | AC | AC | N/D | [81][82][83][100] |
| Uso del microbioma en el cultivo | N/D | AC | AC | AC | AC | [86] |
| Proteger el suelo con leguminosas rastreras | BC | N/D | BC | AC | BC | [92][94] |
| Uso de racimos vacíos de la fruta (RFV) como abono (mulch) | AC | BC | BC | AC | N/D | [94] |
| Promover la siembra de nuevas áreas de palma aceitera en zonas ya intervenidas | AC | AC | BC | BC | AC | [94] |

Finalmente, se identificaron las estrategias de reducción eficientes y sus correspondientes factores determinantes. Estos se compararon en la **figura 3**, donde cada factor está representado por un color específico: el factor social en azul, el factor tecnológico en anaranjado, el factor económico en verde, el factor educativo en celeste y el factor ambiental en morado. Esta representación gráfica evidencia las diferencias entre cada

estrategia, destacando que los palmicultores enfrentan diversos factores clave en la implementación de cada práctica sostenible en el cultivo.

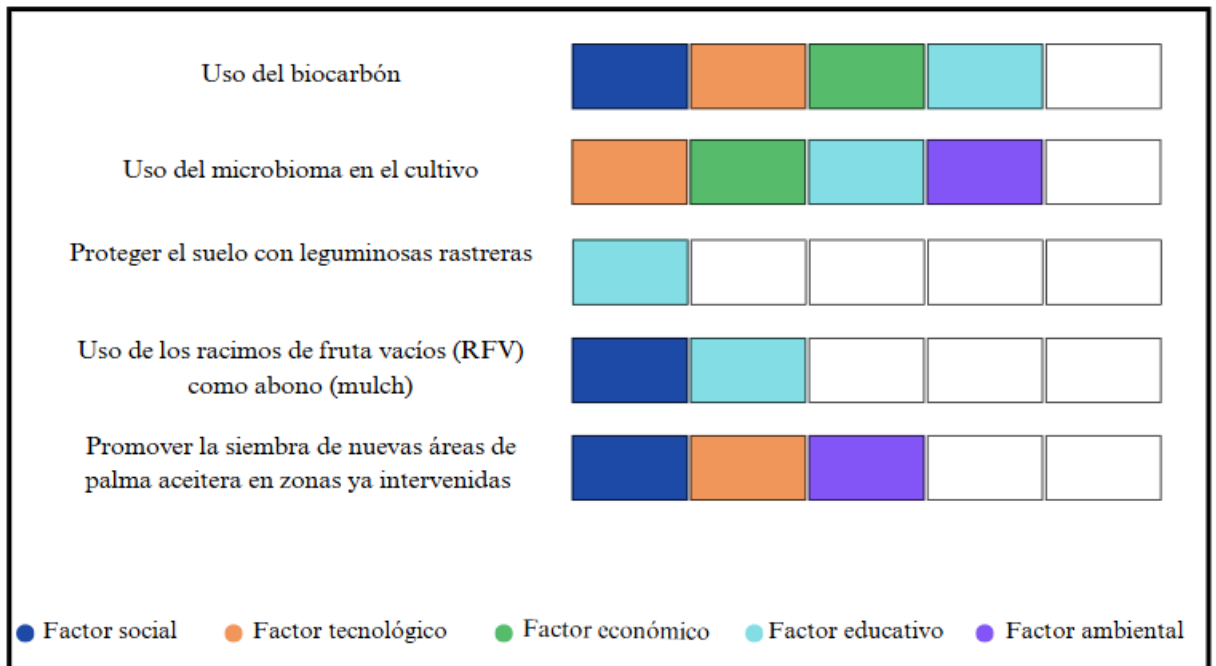


Figura 3: Influencia de factores determinantes en la implementación de estrategias de reducción eficientes en el cultivo de la Palma Aceitera

VI. Discusión

6.1. Estrategias sostenibles para la reducción de la huella ecológica en el cultivo de palma aceitera

Las estrategias analizadas para el cultivo de palma aceitera, según los resultados de la revisión sistemática obtenidas en la **tabla 4**, se agrupan en cinco categorías claves que abordan aspectos esenciales para la sostenibilidad del cultivo. En la categoría de Manejo del Suelo y Fertilidad, se destacan prácticas como el manejo integrado de la fertilidad del suelo (GISF), el uso de biocarbón, la optimización de fertilizantes nitrogenados, la dosificación y programación de aplicaciones de fertilizantes, la aplicación de lodos provenientes de lagunas de oxidación y la protección del suelo mediante leguminosas rastreras. La implementación del GISF y el uso de biocarbón se destacan como estrategias fundamentales. Según Zakaria [101], el GISF mejora la respuesta de las plantas a los fertilizantes aplicados, lo que minimiza las pérdidas y maximiza la absorción de nutrientes, contribuyendo así a una mayor sostenibilidad del cultivo. Asimismo, el biocarbón ha demostrado ser particularmente efectivo cuando se combina con otros insumos orgánicos, como cultivos de cobertura y compost, al mejorar la retención de agua y la fertilidad del suelo [102]. Estos hallazgos son relevantes con la experiencia en la Amazonía, donde la interacción entre el biocarbón, la materia orgánica y la vegetación ha resultado en suelos altamente fértiles [102].

El uso de microbiomas en el cultivo de palma también se presenta como una estrategia sostenible. Según Bajsa et al. [103], las comunidades microbianas son esenciales para la salud del suelo, ya que realizan hasta el 90% de los procesos biológicos necesarios para el crecimiento de las plantas. La protección del suelo cubierto con leguminosas rastreras se considera otra práctica beneficiosa. Según Ruíz y Molina [104], estas leguminosas no solo ayudan a prevenir la erosión, sino que también mejoran la retención de humedad y la disponibilidad de nutrientes. Su capacidad para devolver cantidades notables de nitrógeno al suelo resalta su valor en la mejora de la fertilidad y el control de plagas. El uso eficiente de fertilizantes nitrogenados, según Leyva [105], es clave para incrementar la producción de biomasa, lo que a su vez favorece la construcción y mantenimiento de los niveles de carbono orgánico en el suelo (COS). La implementación de buenas prácticas agrícolas (BPA) en la aplicación de estos fertilizantes es fundamental para

reducir los residuos de nitrato (NO_3^-) en el suelo, lo que ayuda a mitigar el riesgo de emisión de óxidos de nitrógeno (N_2O), un potente gas de efecto invernadero. Esta estrategia no solo optimiza la productividad agrícola, sino que también contribuye a la sostenibilidad ambiental al minimizar las emisiones de GEI y mejorar la salud del suelo a largo plazo. La aplicación de lodos de efluentes de lagunas de oxidación como fertilizante, según Peña et al. [106], es una alternativa eficaz para mejorar la fertilidad del suelo y gestionar los residuos. Estos lodos, ricos en materia orgánica y nutrientes, pueden ser tan eficientes como los fertilizantes comerciales para cultivos como el maíz, incluso permitiendo una reducción de la dosis de nitrógeno recomendada sin afectar el rendimiento. Sin embargo, su uso debe ser cuidadoso debido a los riesgos de contaminación por patógenos y metales pesados. La liberación lenta de nitrógeno y la presencia de otros nutrientes en los lodos mejoran la eficiencia en el uso de fertilizantes y contribuyen a un manejo sostenible de residuos.

En la categoría de Manejo del Agua, el riego por goteo se destaca como un sistema eficiente para la distribución de agua en el cultivo. Esta técnica optimiza el uso de agua y fertilizantes, lo que significa un desarrollo más uniforme de las plantaciones de palma aceitera. Según Castillo [107], la implementación del riego por goteo ha permitido una reducción del 36% en el consumo de agua en las plantaciones de palma en Colombia, alineándose con las tendencias de resultados de otros países productoras de palma aceitera, donde la gestión eficiente del agua es fundamental para mitigar los impactos ambientales. En cuanto al Uso de Residuos, el empleo de racimos de fruta vacíos (RFV) como abono se considera una práctica altamente beneficiosa. Según Rao [108], los racimos vacíos son una excelente fuente de materia orgánica y contienen cantidades importantes de nutrientes. Por ejemplo, una tonelada de racimos vacíos equivale a 7 kg de urea, 2,8 kg de roca fosfórica, 19,3 kg de MOP y 4,4 kg de kieserita [108]. Su uso como cobertura, ya sea en círculo alrededor de las palmas jóvenes o entre hileras en palmas maduras, no solo mejora la calidad del suelo, sino que también optimiza el aprovechamiento de los residuos generados por el cultivo [108].

En la categoría de Certificación y Políticas Sostenibles, se incluye la certificación RSPO y promover la siembra de nuevas áreas de palma aceitera en zonas ya intervenidas. Según Carlson et al. [109], estas estrategias no solo buscan aumentar la producción, sino hacerlo de manera sostenible. El estudio sugiere que la certificación RSPO ha contribuido a una

reducción del 33% en la deforestación relacionada con la palma de aceite en Indonesia, lo que resalta el potencial de esta estrategia para disminuir la huella ecológica del cultivo. Finalmente, en la categoría de protección del cultivo, la estrategia del manejo nutricional del cultivo de palma de aceite, según Gutiérrez et al. [110], a través de la incorporación de residuos de cosecha es una práctica clave para mejorar la fertilidad del suelo y aumentar los rendimientos del cultivo. La adición de materia orgánica estimula la actividad microbiana del suelo, mejorando su estructura, capacidad de retención de agua y disponibilidad de nutrientes esenciales. Entre los microorganismos más utilizados destacan las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) y las cianobacterias, que liberan compuestos bioactivos capaces de estimular el crecimiento de las plantas y protegerlas frente a patógenos [111]. Esta interacción microbiana favorece una agricultura más segura y sostenible, además de reducir la dependencia de fertilizantes inorgánicos y mantener la sostenibilidad de los suelos. En la estrategia de Fitosanitario en el cultivo de fríjol y chontadura enfrentan problemas de plagas y enfermedades requiere un manejo integral que considere tanto el diagnóstico y control de las plagas predominantes como la reducción de impactos ambientales. Mediante la implementación de alternativas agroecológicas y el manejo adecuado de agroquímicos como el Fitosanitario protege el agroecosistema y evita la dependencia de químicos que afectan la salud del suelo y la biodiversidad [112,113]. De este modo, cada estrategia sostenible para el cultivo de palma aceitera debe ser implementada considerando sus características particulares y adaptada a las condiciones del lugar. Esto permitirá maximizar sus beneficios, minimizar los riesgos asociados y garantizar que contribuyan de manera efectiva a la reducción de la huella ecológica y la sostenibilidad del cultivo.

6.2. Factores determinantes que influyen la adopción de estrategias sostenibles

La reducción de la huella de carbono en el cultivo de palma aceitera requiere abordar una combinación compleja de factores sociales, ambientales, económicos, tecnológicos y educativos. Cada factor juega un papel muy importante y prácticamente decisivo en la toma de decisiones para la implementación de estrategias sostenibles. Según Rao [114], desde un enfoque de vista social, el involucramiento comunitario puede ser tanto una fortaleza como una barrera para la sostenibilidad. Por ejemplo, las iniciativas que incorporan a las comunidades locales, como el uso de racimos de fruta vacíos (RFV) como abono, no solo reducen residuos, sino que también generan un impacto positivo en

la percepción de los agricultores sobre la sostenibilidad. En este sentido, estudios en Indonesia han demostrado que los programas comunitarios enfocados en prácticas sostenibles generan una mayor aceptación entre los agricultores, quienes comienzan a valorar los beneficios económicos y ambientales a largo plazo [115]. A pesar de estos avances, la resistencia al cambio sigue siendo un desafío, especialmente en áreas donde predominan las prácticas agrícolas tradicionales. En el caso de Perú, los proyectos de certificación como RSPO han enfrentado barreras debido al desconocimiento de los productores sobre sus beneficios [116]. La RSPO, sustentada en siete principios de sostenibilidad que incluyen el cumplimiento legal, la conservación ambiental y el respeto a derechos laborales y comunitarios, se audita mediante herramientas que adaptan las normativas nacionales, consolidando su carácter de gobernanza transnacional [54]. Su implementación no solo protege el ambiente y a las comunidades, sino que ofrece beneficios como el acceso a mercados internacionales con mayores exigencias de sostenibilidad, requisito de compradores globales como Nestlé o Procter & Gamble, precios diferenciados, mejora en la reputación, reducción de impactos ambientales y menores riesgos legales y sociales al garantizar el cumplimiento normativo [54,55]. Ante este desafío, programas de sensibilización comunitaria y talleres prácticos han demostrado ser efectivos en regiones como San Martín, donde las comunidades han comenzado a adoptar prácticas sostenibles tras comprender sus impactos positivos en la biodiversidad local y en su economía [117].

Desde el punto de vista ambiental, el cultivo de palma aceitera genera consecuencias alarmantes, particularmente en términos de deforestación y pérdida de biodiversidad, lo que contribuye a emisiones de carbono elevadas. Para mitigar estos efectos, estrategias sostenibles como el uso de biocarbón han demostrado ser eficaces, ya que no solo ayudan a capturar carbono, sino que también mejoran la retención de nutrientes y la calidad del suelo. Un ejemplo de ello es un estudio realizado en Malasia, donde la combinación de biocarbón con cultivos de cobertura aumentó en un 30% la capacidad de almacenamiento de carbono en suelos agrícolas [118,119]. Sin embargo, la falta de infraestructura para la producción de biocarbón dificulta su adopción en áreas rurales, lo que impide replicar estos beneficios en distintas zonas. Por el contrario, en Colombia se implementó un modelo exitoso basado en pequeños hornos comunitarios, lo que permitió producir

biocarbón localmente, reducir costos y fomentar su uso masivo entre los agricultores [120].

Desde un enfoque económico, los costos iniciales de estrategias como el uso del biocarbón y el microbioma en cultivos pueden ser prohibitivos para pequeños agricultores. Si bien estas técnicas han demostrado ser altamente efectivas para mejorar la productividad y reducir las emisiones de carbono, su implementación requiere subsidios o apoyo financiero externo. Considerando esto, el biocarbón, obtenido a partir de residuos orgánicos mediante pirólisis, mejora la retención de agua y nutrientes en el suelo, además de fomentar la actividad microbiana beneficiosa [121]. Asimismo, el microbioma en cultivos, como el uso de cepas específicas de *Bacillus subtilis*, ha mostrado un gran potencial para estimular el crecimiento vegetal a través de la producción de sideróforos y fitohormonas, contribuyendo así a un manejo más sostenible del suelo y de los cultivos [122,123]. En Tailandia, un programa gubernamental de microcréditos facilitó la adopción de estas tecnologías por parte de pequeños productores, lo que resultó en un aumento destacable de los rendimientos agrícolas y una mayor sostenibilidad en el uso de recursos [124]. De forma similar, en Perú se han implementado iniciativas en cultivos alternativos, combinando fertilizantes orgánicos y tecnologías microbiológicas. Sin embargo, el acceso limitado a financiamiento formal sigue representando un obstáculo, lo que obliga a muchos agricultores a depender de sistemas convencionales y, en consecuencia, desincentiva la inversión en prácticas sostenibles [125].

En relación con la innovación tecnológica, la implementación de prácticas avanzadas como el uso de microbiomas representa una estrategia prometedora para mejorar la salud del suelo y reducir la dependencia de fertilizantes químicos. En este sentido, los microbiomas establecen interacciones simbióticas con las plantas, lo que potencia la absorción de nutrientes y promueve el crecimiento vegetal, mejorando considerablemente la estructura y fertilidad del suelo [126]. Por ejemplo, estudios realizados en Brasil han demostrado que estas prácticas pueden incrementar la productividad de los cultivos hasta en un 20%, al tiempo que contribuyen a la sostenibilidad al reducir la necesidad de insumos químicos [127]. No obstante, su adopción enfrenta desafíos considerables, ya que estas tecnologías requieren conocimientos técnicos específicos y una capacitación constante para garantizar su eficacia y sostenibilidad a largo plazo. Un ejemplo de éxito se observa en Ecuador, donde un proyecto comunitario logró capacitar a los productores

locales en el manejo de microbiomas, lo que facilitó una adopción más amplia de esta tecnología y una reducción notable en el uso de agroquímicos, mitigando así su impacto ambiental [128].

Finalmente, desde un enfoque educativo, la capacitación de los productores sobre los beneficios a largo plazo de las prácticas sostenibles es fundamental para superar la falta de conocimientos técnicos y la resistencia al cambio. En este contexto, la ausencia de formación específica en estas tecnologías dificulta su adopción, especialmente entre pequeños agricultores acostumbrados a prácticas convencionales [129]. Para enfrentar este desafío, los programas de extensión agrícola han demostrado ser una herramienta eficaz. Un caso relevante es el de Costa Rica, donde la implementación de programas de capacitación sobre el uso eficiente de fertilizantes nitrogenados y el manejo integrado de residuos ha mejorado la productividad agrícola, además de reducir la contaminación por nitratos y las emisiones de gases de efecto invernadero [114]. Por otro lado, la aceptación de certificaciones internacionales, como la Mesa Redonda sobre Aceite de Palma Sostenible (RSPO), depende en gran medida de la educación y sensibilización de los agricultores. En Indonesia, campañas dirigidas a pequeños productores lograron incrementar en un 60% su participación en programas de certificación [115]. Como resultado, no solo se logró una reducción destacable de la deforestación y de las emisiones de carbono asociadas, sino que también se permitió a los productores acceder a mercados más exigentes con mayores incentivos económicos, mejorando así sus ingresos y fomentando un cambio cultural hacia prácticas más sostenibles [115,130].

6.3. Comparar factores determinantes en la reducción de la huella ecológica del cultivo de palma aceitera en Perú

El análisis de los patrones encontrados revela que los factores determinantes desempeñan un papel importante en la comparación de estrategias para reducir eficientemente la huella ecológica. Cada uno de estos factores permite identificar las relaciones existentes entre las cinco estrategias sostenibles y las variables que influyen en su implementación. Por ejemplo, la estrategia basada en el uso de biocarbón como mejorador de suelos se encuentra condicionada por múltiples factores sociales, tecnológicos, económicos y educativos que afectan su adopción por parte de los palmicultores. El biocarbón, obtenido de diferentes tipos de biomasa como corteza de pino, bambú y residuos orgánicos, ha

demostrado ser eficaz en la mejora de la calidad del suelo y la retención de nutrientes, aumentar su capacidad de retención de agua y nutrientes, y contribuir a la reducción de dióxido de carbono [131]. Sin embargo, su efectividad depende de múltiples variables, entre ellas las propiedades del suelo, las condiciones climáticas (como temperatura y precipitación), el tipo de cultivo y el historial de manejo previo del suelo en prácticas agrícolas y pecuarias [132]. Estos factores determinan la viabilidad de su aplicación en tierras agrícolas específicas. A pesar de que esta tecnología ha sido desarrollada y patentada principalmente en países como Estados Unidos y China, donde destacan avances importantes en investigación, en Perú los agricultores aún carecen del conocimiento y acceso necesarios para incorporar esta innovación en sus prácticas agrícolas [131].

Por otro lado, la estrategia basada en el uso del microbioma en la agricultura comparte similitudes con el biocarbón, aunque se diferencia principalmente en el factor ambiental. Esta estrategia debe considerar el entorno natural, ya que la respuesta de las comunidades microbianas al cambio en el uso del suelo es compleja y deriva en una comunidad microbiana diferente en términos taxonómicos y funcionales, lo que afecta la estabilidad y funcionalidad del ecosistema agrícola [133]. Factores edáficos como la relación carbono-nitrógeno (C:N), el contenido de arena y el pH son determinantes para el establecimiento de un nuevo estado de la comunidad microbiana, ya que afectan directamente la capacidad del microbioma para realizar funciones clave como el reciclaje de nutrientes y la descomposición de materia orgánica [134]. La vegetación también juega un papel esencial al aportar recursos al suelo y al influir en las interacciones rizosféricas, especialmente en cultivos como la palma aceitera, donde las prácticas agrícolas, como el uso de agroquímicos, pueden alterar considerablemente la estructura de la comunidad microbiana [135]. Además, cambios en la disponibilidad de recursos pueden favorecer microorganismos generalistas sobre especialistas, afectando la funcionalidad ecológica del microbioma [136].

En comparación con las dos estrategias mencionadas, la estrategia de promover la siembra de nuevas áreas de palma aceitera en zonas ya intervenidas está influida principalmente por tres factores: social, tecnológico y ambiental. Un enfoque similar se aplicó en Tumaco, Colombia, pero con el cultivo de cacao. Allí, la estructuración de grupos productivos permitió aprovechar áreas previamente intervenidas, como cacaotales viejos

e improductivos, mejorando la sostenibilidad y fomentando economías locales en progreso. En este caso, la transferencia tecnológica y la rehabilitación de suelos destacan como elementos clave para abordar desafíos ambientales y sociales, maximizando los beneficios económicos [137]. En Perú, la intervención del Programa de Erradicación de la Coca en zonas como Aguaytía y Pichis Palcazú, según la Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC), ha resultado fundamental para evitar la reactivación de cultivos ilegales en áreas ya intervenidas por el cultivo de la coca. Esto subraya la importancia de ofrecer alternativas económicas sostenibles, como la promoción de cultivos de cacao, palma aceitera y café, así como iniciativas a corto plazo como cultivos anuales y crianzas, para evitar la reactivación de cultivos ilegales y fomentar la sostenibilidad económica [138].

Por otra parte, las estrategias relacionadas con el uso de racimos de frutas vacíos (RFV) como mulch y el empleo de leguminosas rastreras presentan menos barreras en su adopción. En Malasia, durante las dos últimas décadas, los racimos de frutas vacíos solían ser quemados, y la ceniza resultante se incorporaba en la plantación de palma aceitera como fuente de fertilizantes. Debido a la estricta regulación que prohíbe la quema, los RFV ahora se devuelven al campo y se utilizan como mulch [139]. En Perú según Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI), cada hectárea de palma aceitera puede generar entre 50 y 70 toneladas de biomasa residual anualmente, siendo los RFV un 30.5% de esta producción, equivalente a 1.1 millones de toneladas anuales [140]. Sin embargo, a pesar de este potencial, el factor educativo desempeña un papel fundamental en la implementación de esta estrategia sostenible. Muchos agricultores carecen de la capacitación y el conocimiento necesarios sobre los beneficios que podría traer el uso de RFV como mulch, lo que limita su adopción. De manera similar, en Colombia, el uso de leguminosas rastreras como abono verde se emplea para aportar nutrientes, carbono orgánico y mejorar las propiedades del suelo, reduciendo la dependencia de fertilizantes químicos. Esta práctica no solo beneficia directamente la calidad del suelo, sino que también contribuye al bienestar económico, social y ambiental [141]. Esto resalta la necesidad de adoptar estrategias que sean técnicamente viables y culturalmente accesibles para los productores en el contexto peruano.

Un aspecto adicional relevante para comprender los desafíos de la sostenibilidad en el Perú es el uso ilegal o informal de tierras en el cultivo de palma aceitera. Esta situación

constituye una barrera importante para la certificación sostenible y la implementación de políticas públicas efectivas. Investigaciones han demostrado que la expansión del cultivo en la Amazonía peruana ha estado vinculada con procesos de deforestación ilegal, generando impactos ambientales y sociales graves, en particular para las comunidades indígenas [142,143]. La reforma normativa aprobada en 2025, que permite convertir legalmente tierras boscosas sin autorización estatal, ha legitimado retroactivamente prácticas de deforestación, debilitando el control ambiental y dificultando la implementación de mecanismos de trazabilidad y certificación [144,145,146].

Asimismo, existen desigualdades entre pequeños, medianos y grandes productores que influyen directamente en la adopción de estrategias sostenibles. Aunque los pequeños productores representan casi la mitad del área cultivada, sus rendimientos alcanzan aproximadamente 11 toneladas por hectárea, una cifra inferior a la obtenida en grandes plantaciones que supera las 16 toneladas por hectárea [147,148,149]. Esta diferencia limita su capacidad de acceder a certificaciones o implementar innovaciones tecnológicas. Además, la participación de los pequeños productores en alianzas empresariales suele implicar elevados niveles de endeudamiento, lo que restringe su autonomía económica. Por otro lado, los grandes productores disponen de mayores recursos financieros y técnicos para acceder a mercados internacionales con estándares de sostenibilidad y adoptar prácticas alineadas con dichos requisitos [147,150]. Esto demuestra que las políticas públicas y las estrategias de apoyo deben diferenciarse según el tipo de productor, ofreciendo incentivos y programas de asistencia técnica adaptados a las distintas escalas de producción.

Finalmente, este estudio presenta algunas limitaciones que deben tenerse en cuenta. En primer lugar, se encontró poca información científica nacional relacionada con el cultivo de palma aceitera en el Perú, lo que redujo la cantidad de fuentes disponibles durante la revisión. Esto dificultó comparar de forma más precisa las estrategias sostenibles aplicadas en otros países con la realidad peruana. En segundo lugar, la metodología usada se basó en estudios de caso y documentos secundarios, lo que no permitió hacer comprobaciones directas en campo. Además, al ser un análisis cualitativo, los resultados no pueden aplicarse de manera general a todos los departamentos productores del Perú, ya que cada zona productora tiene condiciones sociales, económicas y ambientales distintas. Esto puede afectar si las estrategias propuestas funcionarían igual en todos los

casos. Por eso, se sugiere que en futuras investigaciones se realicen estudios en campo y se genere más información científica en el Perú sobre este tema. Esto ayudaría a tomar decisiones mejor informadas y más adaptadas a cada realidad local, lo cual es importante para avanzar hacia una agricultura de palma aceitera más sostenible y responsable con el ambiente.

VII. Conclusiones

- La revisión sistemática permitió encontrar 13 estrategias sostenibles aplicadas en el cultivo de palma aceitera. De ellas, cinco presentan un mayor potencial de aplicabilidad en el contexto peruano: uso de biocarbón, aplicación de microbiomas, siembra de leguminosas rastreras, uso de racimos vacíos de fruta (RFV) como abono y siembra en zonas ya intervenidas. Estas estrategias ayudan a disminuir el uso de fertilizantes, mejorar el suelo y reducir las emisiones contaminantes, lo que las hace útiles para promover una agricultura más responsable en el país.
- Los factores que influyen en la adopción de estrategias sostenibles por parte de los agricultores son: social, educativo, económico, tecnológico y ambiental. Se observó que muchos productores no aplican prácticas sostenibles porque no cuentan con capacitación técnica o porque los costos son muy altos. Reconocer estas dificultades es importante para promover soluciones que faciliten su adopción.
- Las estrategias con mayor potencial de aplicabilidad tienen beneficios en común, como mejorar el suelo y reducir la huella de carbono. Sin embargo, algunas requieren mayor inversión (como el biocarbón y los microbiomas) y otras son menos complejas de aplicar (como las leguminosas y los RFV). Estas diferencias muestran la necesidad de ajustar cada estrategia según las condiciones económicas, técnicas y sociales de cada zona, para asegurar que su implementación sea viable y sostenible en el tiempo.

VIII. Recomendaciones

- Implementar programas de apoyo económico para pequeñas y medianas plantaciones de palma aceitera, gestionados por entidades estatales peruanas en colaboración con organizaciones internacionales, para facilitar la adopción de prácticas agrícolas sostenibles.

- Organizar capacitaciones técnicas sobre manejo sostenible de la palma aceitera, integrando la difusión de estrategias de reducción y promoviendo al mismo tiempo la investigación en biofertilizantes y tecnologías agrícolas innovadoras que contribuyan a disminuir la huella ecológica del cultivo.

- Promover investigaciones similares centradas en la huella ecológica de otros cultivos, para ampliar el conocimiento sobre las implicancias ambientales y estrategias de mitigación tanto a nivel nacional como internacional.

IX. Bibliografía

1. JUNPALMA - Junta Nacional de Palma Aceitera del Perú [Internet]. [citado 28 de abril de 2024]. Disponible en: <https://junpalmaperu.org/palma/>
2. Vignola R, Watler W, Poveda K, Berrocal A, Vargas A. Cultivo de palma aceitera en Costa Rica; 2017.
3. Ruiz J, Medina G, González I, Flores H, Ramírez G, Ortiz C, et al. Requerimientos Agroecológicos de cultivos [internet]. 2ª ed. Jalisco: Talleres Gráficos de Prometo Editores; 2013 [Consultado 12 Mayo 2014]. 564p. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Jose-Ruiz-Corral/publication/343047223_REQUERIMIENTOS_AGROECOLOGICOS_DE_CULTIVOS_2da_Edicion/links/5f1310e04585151299a4c447/REQUERIMIENTOS-AGROECOLOGICOS-DE-CULTIVOS-2da-Edicion.pdf
4. Cruz Alvarado J. Características botánicas y climatológicas de los principales materiales de siembra de palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.), en el Ecuador [tesis de titulación en internet]. Babahoyo: Universidad Técnica de Babahoyo; 2022 [Citado el 28 de abril del 2024]. 26p. Disponible en: <http://dspace.utb.edu.ec/bitstream/handle/49000/16074/E-UTB-FACIAG-%20AGROP-000108.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
5. Kumar K. El aceite de palma en el mercado global y sus oportunidades en Estados Unidos. Palmas [Internet]. 2016 [citado 28 de abril de 2024]; 37: 319-321. Disponible en: <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/11953>
6. Murphy DJ, Goggin K, Paterson RRM. Oil palm in the 2020s and beyond: challenges and solutions. CABI Agriculture and Bioscience [Internet]. 2021 [Citado el 28 de abril de 2024]; 2(1) : 39. Disponible en: <https://doi.org/10.1186/s43170-021-00058-3>
7. Álvarez Alonso J, Belaúnde LE, Cabieses Cubas H. Deforestación en tiempos de cambio climático. Chirif A, editor. Copenhague, Dinamarca: IWGIA, Grupo Internacional de Trabajo sobre Asuntos Indígenas; 2018. 226 p.
8. Fort R, Borasino E. ¿Agroindustria en la Amazonía? Posibilidades para el desarrollo inclusivo y sostenible de la palma aceitera en el Perú [Internet]. Repositorio institucional - GRADE. Grupo de Análisis para el Desarrollo; 2016

- [citado 27 de abril de 2024]. Disponible en: <https://repositorio.grade.org.pe/handle/20.500.12820/638>
9. Ministerio del Ambiente: Información institucional [Internet]. Lima: MINAM; c2012 [citado 12 de mayo de 2024]. Disponible en: <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/huella-ecologica-peru>
 10. Guarín J, Vitoncó Y. La huella ecológica, indicador de sostenibilidad ambiental y social. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar* [Internet]. 2022 [Citado el 02 de septiembre de 2024]; 6(1): 4156-4175. Disponible en: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i1.1791
 11. Martínez R. Educación y huella ecológica. *Revista Electrónica Actualidades Investigativas en Educación* [internet]. 2008 [Citado el 28 de abril del 2024]; 8(1): 1-28. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=44780103>
 12. Vences L, Díaz J, Chávez R, Bravo M. La huella ecológica aplicada al análisis del ciclo de vida, corporaciones y ciudades: una revisión sistemática. *Innovar* [internet]. 2024 [Citado el 28 de abril del 2024]; 34(91): e101009. Disponible en: <https://doi.org/10.15446/innovar.v34n91.101009>
 13. La huella ecológica [Internet]. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. [citado el 25 de septiembre de 2024]. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/ceneam/exposiciones-del-ceneam/exposiciones-itinerantes/huella-ecologica.html>
 14. Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica [Internet]. Quito: MAATE; c2013 [Citado 24 de septiembre de 2024]. Disponible en: http://huella-ecologica.ambiente.gob.ec/huella_nacional.php
 15. Ministerio del Ambiente [Internet]. Lima: MINAM, c2011 [Citado 24 de septiembre de 2024]. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/minam/informes-publicaciones/2754-huella-ecologica-en-el-peru-calculo-nacional-y-departamental>
 16. Naturales S de MA y R. gov.mx. [citado 28 de abril de 2024]. Qué es la huella ecológica. Disponible en: <http://www.gob.mx/semarnat/articulos/que-es-la-huella-ecologica>
 17. Musikavong C, Gheewala, S. Ecological footprint assessment towards eco-efficient oil palm and rubber plantations in Thailand. *Journal of Cleaner*

- Production [internet]. 2017 [Citado el 11 de mayo del 2024]; 140(2): 581-589. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.159>
18. Jaibumrung K, Nilsalab P, Gheewala S, Musikavong C. Ecological footprint, water scarcity footprint, and benefit to cost ratio analysis towards sustainable rice production in Thailand. *Sustainable Production and Consumption* [internet]. 2023 [Citado el 11 de mayo del 2024]; 39: 79-92. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.04.019>
 19. Li M, Zhou Y, Wang Y, Singh VP, Li Z, Li Y. An ecological footprint approach for cropland use sustainability based on multi-objective optimization modelling. *J Environ Manage* [Internet]. 2020 [Citado el 11 de mayo del 2024]; 273: 111147. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111147>
 20. Carpintero O. La huella ecológica de la agricultura y la alimentación en España, 1955-2000. Áreas. *Revista Internacional de Ciencias Sociales* [internet]. 2006 [Citado el 16 de mayo del 2024]; (25), 31–45. Disponible en: <https://revistas.um.es/areas/article/view/127991>
 21. Hernández E, López F, Alonso F, Conesa C, Álvarez Y. La huella ecológica del cultivo de olivo en España y su aplicabilidad como indicador de agricultura sostenible. *Revistas.um.es* [internet]. 2004 [Citado el 16 de mayo del 2024]; 34: 141-155. Disponible en: <https://revistas.um.es/geografia/article/view/44821/42921>
 22. Swelam A, Farag A, Ramasamy S, Ghandour A. Effect of Climate Variability on Water Footprint of Some Grain Crops under Different Agro-Climatic Regions of Egypt. *Atmosphere* [internet]. 2022 [Citado el 02 de septiembre de 2024]; 13(8): 1180. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/atmos13081180>
 23. Li Y, Wang Y, He Q, Yang Y. Calculation and Evaluation of Carbon Footprint in Mulberry Production: A Case of Haining in China. *Int. J. Environ. Res. Public Health* [Internet]. 2020 [Citado el 02 de septiembre de 2024]; 17(4): 1339. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/ijerph17041339>
 24. Ardisana E, Gaínza B, Torres A, Fosado O. Agricultura en Sudamérica: Huella ecológica y el futuro de la producción agrícola. *Revista Chakiñan* [internet]. 2018 [Citado el 16 de mayo del 2024]; (5), 90-101. Disponible en: <https://www.redalyc.org/jour717/571763394006/html/nal/5>

25. Meza Vargas L. Huella ecológica en la población del Distrito de Yauyos, Jauja [tesis de licenciatura]. Perú: Universidad Nacional del Centro del Perú; 2020. 107p
26. Jaimez Gutierrez L. Estimación de la huella ecológica de la universidad peruana unión [tesis de maestría]. Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú; 2019. 115p
27. Acuña L, Ccasani J. Estimación de la huella ecológica en la producción de café pergamino. Caso de los caficultores de la Cooperativa Agraria Cafetalera La Prosperidad de Chirinos. Campus [internet]. 2022 [Citado el 16 de mayo del 2024]; 27(33). Disponible en: <https://portalrevistas.aulavirtualusmp.pe/index.php/rc/article/view/2208>
28. Meena RS, Kumar S, Datta R, Lal R, Vijayakumar V, Brtnicky M, et al. Impact of Agrochemicals on Soil Microbiota and Management: A Review. Tierra [internet]. 2020 [Citado el 28 de abril del 2024]; 9(2): 34. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/land9020034>
29. Priyanka G, Singiri JR, Adler-Agmon Z, Sannidhi S, Daida S, Novoplansky N, et al. Detailed analysis of agro-industrial byproducts/wastes to enable efficient sorting for various agro-industrial applications. Bioresources and Bioprocessing [Internet]. 2024 [Citado el 01 de septiembre del 2024];11(45). Disponible en: <https://doi.org/10.1186/s40643-024-00763-7>
30. Damiani S, Leite M, Alcântara R, Gomes A, Sousa C. Water and sediment pesticide contamination on indigenous lands surrounded by oil palm plantations in the Brazilian Amazon. Heliyon [internet]. 2023 [Citado el 28 de abril del 2024]; 9(10): e19920. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19920>
31. Pashkevich M, Pett B, Marshall C, Caliman J-P, Freeman B, Guahn M, et al. Conversion of rainforest to both traditional and industrial oil palm systems changes the biodiversity, web-building, and prey capture of understory spiders (Liberia, West Africa). Agriculture, Ecosystems & Environment [internet]. 2024 [Citado el 01 de septiembre del 2024]; 373(109102): 109102. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.109102>
32. Clough Y, Krishna VV, Corre MD, Darras K, Denmead LH, Meijide A, et al. Land-use choices follow profitability at the expense of ecological functions in

- Indonesian smallholder landscapes. *Nat Commun* [internet]. 2016 [Citado el 28 de abril del 2024]; 7(1): 13137. Disponible en: DOI: 10.1038/ncomms13137
33. Hewitt C, MacKenzie A, Di Carlo P, Di Marco C, Dorsey J, Evans M, et al. Nitrogen management is essential to prevent tropical oil palm plantations from causing ground-level ozone pollution. *Proc Natl Acad Sci* [internet]. 2009 [Citado el 28 de abril del 2024]; 106(44): 18447-18451. Disponible en: <https://doi.org/10.1073/pnas.0907541106>
 34. Gatto M, Wollni M, Qaim M. Oil palm boom and land-use dynamics in Indonesia: The role of policies and socioeconomic factors. *Land Use Policy* [internet]. 2015 [Citado el 28 de abril del 2024]; 46: 292-303. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.03.001>
 35. Chiriaco M, Galli N, Santini M, Rulli M. Deforestation and greenhouse gas emissions could arise when replacing palm oil with other vegetable oils. *Sci Total Environ* [internet]. 2024 [Citado el 28 de abril del 2024]; 914: 169486. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169486>
 36. Azhar B, Saadun N, Prideaux M, Lindenmayer D. The global palm oil sector must change to save biodiversity and improve food security in the tropics. *Journal of Environmental Management* [internet]. 2017 [Citado el 28 de abril del 2024]; 203: 457-466. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.08.021>
 37. Agronegocios y crisis climática en el Perú [Internet]. Oxfam en Perú. [citado 25 de septiembre de 2024]. Disponible en: https://oi-files-cng-prod.s3.amazonaws.com/peru.oxfam.org/s3fs-public/file_attachments/Agronegocios-y-crisis-clim%C3%A1tica-Per%C3%BA.pdf
 38. Briceño G. Liberación sostenida de agroquímicos a partir de matrices biopoliméricas, en la Argentina [Proyecto de grado de Ingeniería de Materiales en internet]. Mar del Plata: Universidad Nacional de Mar del Plata; 2021 [Citado el 24 de septiembre del 2024]. 124p. Disponible en: <https://rinfi.fi.mdp.edu.ar/bitstream/handle/123456789/502/GBrice%c3%b1o-TFG-IM-2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
 39. Banerjee A, Jhariya M, Meena R, Yadav D. Ecological footprints in agroecosystem: An overview. *Agroecological Footprints Management for*

- Sustainable Food System [Internet]. 2020 [Citado el 24 de septiembre de 2024]; 1(1): 1-23. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-981-15-9496-0_1
40. Méndez Prada J. Implementación de buenas prácticas agrícolas en el manejo de la plantación el tigre de palma africana en Monterrey Casanare [tesis de licenciatura]. Colombia: Universidad de Cundinamarca; 2016. 55p.
 41. Wheaton E, Kulshreshtha S. Environmental Sustainability of Agriculture Stressed by Changing Extremes of Drought and Excess Moisture: A Conceptual Review. Sustainability [internet]. 2017 [Citado el 11 de mayo del 2024]; 9(6): 970. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/su9060970>
 42. Piñeiro V, Arias J, Dürr J, Elverdin P, Ibañez A, Kinengyere A, et al. A scoping review on incentives for adoption of sustainable agricultural practices and their outcomes. Nature Sustainability [internet]. 2020 [Citado el 11 de mayo del 2024]; 3: 809-820. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41893-020-00617-y>
 43. Swart R, Levers C, Davis J, Verburg P. Meta-analyses reveal the importance of socio-psychological factors for farmers' adoption of sustainable agricultural practices. One Earth [internet]. 2023 [Citado el 11 de mayo del 2024]; 6(12): 1771-1783. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2023.10.028>
 44. Carvajal J, Mera A. Fertilización biológica: técnicas de vanguardia para el desarrollo agrícola sostenible. Rev.P+L [Internet]. 2010 [Citado el 12 de mayo de 2024]; 5(2): 77-96. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1909-04552010000200007&script=sci_arttext
 45. González P. Consecuencias ambientales de la aplicación de fertilizantes [internet]. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. Disponible en: https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/27059/1/Consecuencias_ambientales_de_la_aplicacion_de_fertilizantes.pdf
 46. Valverde M. Fertilizantes agrícolas: tipos de fertilizantes, usos y beneficios [Internet]. ZS España. Zschimmer & Schwarz España; 2021 [Citado el 11 de mayo de 2024]. Disponible en: <https://www.zschimmer-schwarz.es/noticias/fertilizantes-agricolas-tipos-de-fertilizantes-usos-y-beneficios/>
 47. Tang M, Nazeeb M, Loong S. Tipos de fertilizantes y métodos de aplicación en plantaciones de palma de aceite malasia. Palmas [Internet]. 2000 [Citado el 11

- de mayo de 2024]; 21(especial,): 242–57. Disponible en: <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/836>
48. Mahmud M, Chong K. Formulation of biofertilizers from oil palm empty fruit bunches and plant growth-promoting microbes: A comprehensive and novel approach towards plant health. *Journal of King Saud University - Science* [Internet]. 2021 [Citado el 20 de julio de 2025]; 33(8): 101647. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101647>
 49. Alonso O, Torres J. Aplicación de fertilizantes en palma de aceite. *Palmas* [Internet]. 2013 [Citado el 12 de mayo del 2024]; 34(1): 21-28.
 50. Zakaria Z. Manejo de suelos y fertilizantes en plantaciones de palma de aceite en Malasia. *Palmas* [Internet]. 1998 [Citado el 12 de mayo de 2024]; 19(especial): 207-2017. Disponible en: <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/666>
 51. Supriatna J, Setiawati M, Sudirja R, Suherman C, Bonneau X. Migration from inorganic to organic fertilization for a more sustainable oil palm agro-industry. *Helion* [internet]. 2023 [Citado el 15 de mayo del 2024]; 9(12): e22868. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22868>
 52. Mite F, Espinosa y. J. Efecto del Manejo del Cultivo y los Fertilizantes en el Uso Eficiente de Nitrógeno en Palma Aceitera [Internet]. *Ipni.net*. [citado el 14 de mayo de 2024]. Disponible en: [http://research.ipni.net/research/nla.nsf/0/720f605e7407252f85257bce005784f0/\\$FILE/Spanish,%20Eficiencia%20N%20en%20palma.pdf](http://research.ipni.net/research/nla.nsf/0/720f605e7407252f85257bce005784f0/$FILE/Spanish,%20Eficiencia%20N%20en%20palma.pdf)
 53. Innocenti E, Oosterveer P. Opportunities and bottlenecks for upstream learning within RSPO certified palm oil value chains: A comparative analysis between Indonesia and Thailand. *Journal of Rural Studies* [internet]. 2020 [Citado el 11 de mayo del 2024]; 78: 426-437. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2020.07.004>
 54. Córdova D, Abrams J, Selfa T. Achieving Palm Oil Sustainability Under Contract: Roundtable on Sustainable Palm Oil and Family Farmers in the Brazilian Amazon. *Current Research in Environmental Sustainability* [internet]. 2022 [Citado el 11 de mayo del 2024]; 4: 100160. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.crsust.2022.100160>

55. Why sustainable palm oil? - roundtable on sustainable palm oil (RSPO) [Internet]. Roundtable on Sustainable Palm Oil (RSPO). 2022 [Citado el 11 de mayo del 2024]. Disponible en: <https://rspo.org/why-sustainable-palm-oil/>
56. Chirinos D, Castro R, Cun J, Castro J, Peñarrieta S, Solis L, et al. Los insecticidas y el control de plagas agrícolas: la magnitud de su uso en cultivos de algunas provincias de Ecuador. *Ciencias y Tecnología Agropecuaria* [Internet]. 2020. [Citado el 02 de septiembre de 2024]; 21(1): e1276. Disponible en: https://doi.org/10.21930/rcta.vol21_num1_art:1276
57. Revelo M. Fitosanidad del cultivo de la palma aceitera. *Palmas* [Internet]. 1983 [Citado el 03 de junio de 2024]; 4(1): 19-25. Disponible en: <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/34>
58. Calvache H. Manejo integrado de plagas de la palma de aceite. *Palmas* [Internet]. 1995 [Citado el 13 de junio de 2024]; 16(especial): 255-264. Disponible en: <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/download/517/517>
59. Sánchez A. Enfermedades de la palma de aceite en América Latina. *Palmas* [Internet]. 1990 [Citado el 13 de junio de 2024]; 11(4): 5-38. Disponible en: <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/download/265/265>
60. Oliva V, Bonilla G. El nemátodo entomopatógeno *Steinernema carpocapsae* para el control biológico de la plaga *Sagalassa valida* Walker En palma aceitera *Elaeis guineensis*: Una alternativa al uso de pesticidas químicos. *Revista Naturaleza, Sociedad y Ambiente* [Internet]. 2014 [Citado el 13 de junio de 2024]; 1: 85-95. Disponible en: <https://revistacunsurori.com/index.php/revista/article/view/5/>
61. Sobrido M, Rumbo J. La revisión sistemática: pluralidad de enfoques y metodologías. *Enfermería Clínica* [Internet]. 2018. [Citado el 19 de julio de 2025]; 28(6): 387-393. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.enfcli.2018.08.008>
62. Instituto Nacional de Estadística e Informática [internet]. Lima: INEI; c2018. Loreto: Resultados Definitivos. [Citado 07 de junio de 2024]. Disponible en: https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digiales/Est/Lib1561/16TOMO_01.pdf
63. Instituto Nacional de Estadística e Informática [internet]. Lima: INEI; c2018. San Martín: Resultados Definitivos. [Citado 07 de junio de 2024]. Disponible en: https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digiales/Est/Lib1573/22TOMO_01.pdf

64. Instituto Nacional de Estadística e Informática [internet]. Lima: INEI; c2018. Huánuco: Resultados Definitivos. [Citado 07 de junio de 2024]. Disponible en: https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitaless/Est/Lib1570/10TOMO_01.pdf
65. Instituto Nacional de Estadística e Informática [internet]. Lima: INEI; c2018. Ucayali: Resultados Definitivos. [Citado 07 de junio de 2024]. Disponible en: https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitaless/Est/Lib1554/25TOMO_01.pdf
66. Urrútia G, Bonfill X. PRISMA declaration: A proposal to improve the publication of systematic reviews and meta-analyses. *Med Clin (Barc)* [Internet]. 2010 [citado 07 de junio del 2020]; 135(11): 507–11. Disponible en: DOI: 10.1016/j.medcli.2010.01.015
67. Ouzzani M, Hammady H, Fedorowicz Z, Elmagarmid A. Rayyan---a web and mobile app for systematic reviews. *Systematic Reviews* [Internet]. 2016 [Citado 07 de junio del 2024]; 5(1):210. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1186/s13643-016-0384-4>
68. Moher D, Liberati A, Tetzlaff J, Altman DG, The PRISMA Group. Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. *PLOS Medicine*. 2009 [Citado el 7 de junio del 2024]; 6(7): e1000097. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>
69. Biblioguias: Huella de carbono: Inicio. 2012 [citado el 7 de junio de 2024]; Disponible en: <https://biblioguias.cepal.org/huellacarbono>
70. Lovarelli D, Bacenetti J, Fiala M. Water Footprint of crop productions: A review. *Science of The Total Environment* [internet]. 2016 [Citado 7 de junio del 2024]; 548-549: 236-251. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.022>
71. Bongiovanni R, Tuninetti L. Huella de carbono y huella energética del etanol anhidro producido en una mini destilería “minidest” en origen. *Revista de investigadores agropecuarias* [internet]. 2021 [Citado 7 de junio del 2024]; 47(2), 273-284. Disponible en: <http://www.scielo.org.ar/pdf/ria/v47n2/0325-8718-RIA-47-02-00273.pdf>
72. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Food and Agriculture Organization of the United Nations [internet]. Rome:ONU; 2020 [citado 7 de

- junio de 2024]. Disponible en: <https://www.fao.org/sustainability/news/detail/es/c/1279267/>
73. Meena RS, Kumar S, Datta R, Lal R, Vijayakumar V, Brtnicky M, et al. Impact of Agrochemicals on Soil Microbiota and Management: A Review. *Tierra* [internet]. 2020 [Citado 28 de abril del 2024]; 9(2): 34. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/land9020034>
 74. Amacifuen Vigo J. Propuesta de gestión de los recursos naturales como instrumento de mejora ante la expansión del cultivo de palma aceitera en el caserío Shambo- Aguaytia de la región Ucayali 2018. [Tesis de doctorado]. Perú: Universidad Nacional de Ucayali; 2020. 126p.
 75. Delgado T, Ladino G, Arias N. Evaluación de sistemas de riego utilizados en el cultivo de palma de aceite. *Corporación Centro de Investigación en Palma de Aceite* [Internet]. 2021 [Citado el 19 de julio de 2025]. Disponible en: <https://repositorio.fedepalma.org/bitstream/handle/123456789/141302/Evaluacio%CC%81n%20de%20sistemas%20de%20riego%20w.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
 76. Huamán A, Palacios D. Agroindustria en la Amazonía colonizada: Una aproximación etnográfica a la cadena de valor de la palma aceitera en Tocache, San Martín. Perú: el problema agrario en debate: SEPIA XVII. 2018:185-244.
 77. Flores Amasifuen B, Macedo Ruiz H. MODELO DE UN SISTEMA DE GESTIÓN AMBIENTAL ESCOLAR Y SU INFLUENCIA EN LAS APTITUDES Y ACTITUDES AMBIENTALES EN LA INSTITUCIÓN EDUCATIVA RURAL INTEGRADA INICIAL N°634 - PRIMARIA N° 64722 EL TRIUNFO, DISTRITO DE YARINACocha, REGIÓN UCAYALI, 2018. [Tesis de licenciatura]. Perú; 2019. 118p.
 78. Palomares Ojeda C. La huella ecológica cómo indicador de sostenibilidad ambiental. [Trabajo de investigación]. España; 2018. 53p.
 79. Murphy DJ, Goggin K, Paterson RRM. Oil palm in the 2020s and beyond: challenges and solutions. *CABI Agric Biosci* [Internet]. 2021 [Citado el 28 de abril de 2024]; 2(1) : 39. Disponible en: <https://doi.org/10.1186/s43170-021-00058-3>
 80. Hassan MA, Farid MAA, Zakaria MR, Ariffin H, Andou Y, Shirai Y. Palm oil expansion in Malaysia and its countermeasures through policy window and

- biorefinery approach. *Environ Sci Policy* [Internet]. 2024;153(103671):103671. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2024.103671>
81. Yadav R, Ramakrishna W. Biochar as an environment-friendly alternative for multiple applications. *Sustainability* [Internet]. 2023 [citado el 10 de octubre de 2024];15(18):13421. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/su151813421>
 82. Jeswani HK, Saharudin DM, Azapagic A. Environmental sustainability of negative emissions technologies: A review. *Sustain Prod Consum* [Internet]. 2022;33:608–35. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.06.028>
 83. Stewart-Wade SM. Efficacy of organic amendments used in containerized plant production: Part 2 – Non-compost-based amendments. *Sci Hortic (Amsterdam)* [Internet]. 2020;260(108855):108855. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108855>
 84. Srivastava AK, Wu Q-S, Mousavi SM, Hota D. Integrated soil fertility management in fruit crops: An overview. *Int J Fruit Sci* [Internet]. 2021;21(1):413–39. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1080/15538362.2021.1895034>
 85. Akande J. FOREST ECOSYSTEM POTENTIALS IN NIGERIA: OPPORTUNITIES FOR GREEN ECONOMY IN THE 21ST CENTURY. Commonwealth Forestry Association [Internet]. 2020 [Citado el 10 de octubre de 2024]; 1:16-29. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Chukwuma-Arinzechi/publication/349763845_Proceedings_3RD_CFA_CONFERENCE_FUTA_2020/links/6040cd6e4585154e8c758cf7/Proceedings-3RD-CFA-CONFERENCE-FUTA-2020.pdf
 86. Karabulut F, Parray J, Mir M. Tendencias emergentes para aprovechar el metaboloma y el microbioma de las plantas para la producción sostenible de alimentos. *Micro environer* [Internet]. 2021 [citado el 10 de octubre de 2024]; 1(01): 33-5. Disponible en: <https://microenvironer.com/micro/article/view/6>
 87. Giller KE, Andersson J, Delaune T, Silva JV, Descheemaeker K, van de Ven G, et al. IFAD Research Series 83: The future of farming: who will produce our food?. *Ag Econ Search* [Internet]; 2022 [citado el 10 de octubre de 2024]. Disponible en: <https://ageconsearch.umn.edu/record/322005/?v=pdf>
 88. Van Noordwijk M, Khasanah N, Dewi S. Can intensification reduce emission intensity of biofuel through optimized fertilizer use? Theory and the case of oil

- palm in Indonesia. *Glob Change Biol Bioenergy* [Internet]. 2016 [Citado el 10 de octubre de 2024]; 9(5):940–52. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1111/gcbb.12398>
89. Davis SC, Boddey RM, Alves BJR, Cowie AL, George BH, Ogle SM, et al. Management swing potential for bioenergy crops. *Glob Change Biol Bioenergy* [Internet]. 2013 [Citado el 10 de octubre de 2024]; 5(6):623–38. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1111/gcbb.12042>
 90. Goenadi DH, Setyobudi RH, Yandri E, Siregar K, Winaya A, Damat D, et al. Land suitability assessment and soil organic carbon stocks as two keys for achieving sustainability of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.). *Sarhad J Agric* [Internet]. 2021 [Citado el 10 de octubre de 2024] ;37(s1). Disponible en: <http://dx.doi.org/10.17582/journal.sja/2022.37.s1.184.196>
 91. Rodríguez M. Desempeño ambiental del sector palmero en Colombia. *Palmas* [Internet]. 2007 [citado el 10 de octubre de 2024];28(especial,):208-13. Disponible en: <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1309>
 92. Rodríguez B. M, Van Hoof B. El desempeño ambiental del sector palmicultor Colombiano : una década de avances y un futuro promisorio. *Palmas* [Internet]. 2003 [citado 10 de octubre de 2024];24(3):69-87. Disponible en: <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/973>
 93. Morales L, Neira A, Becerra J. Aplicación de mejores prácticas fitosanitarias en el cultivo de la palma de aceite. *Cenipalma* [Internet]. 2017. [Citado el 10 de octubre de 2024]. Disponible en: <https://fedepalma.org/wp-content/uploads/2017/10/Cartilla-Aplicacion-de-mejores-practicas-fitosanitarias-en-el-cultivo-de-la-palma-de-aceite.pdf>
 94. Romero M, Pareja P, Tristán M, Sánchez J, Quintero M. Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero de un modelo de negocio sostenible de palma aceitera en la región de Ucayali, Perú. *Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT)* [Internet]. 2022. [Citado el 10 de octubre de 2024]; 526: 58. Disponible en: <https://cgspace.cgiar.org/server/api/core/bitstreams/c75749d0-b190-4536-a49e-9044d5985550/content>
 95. Malacatus P, Bastidas P, Chuquitarco P. Análisis químico y de peligrosidad de lodos del sistema de tratamiento de aguas residuales en la industria de palma.

- FIGEMPA: Investigación y Desarrollo [Internet]. 2019 [Citado el 19 de julio de 2025]; 8(2): 30-38. Disponible en: <https://doi.org/10.29166/revfig.v1i2.1726>
96. Brugés C, García J, Dueñas J, Zagala G, Ligia M. Evaluación económica de sistemas de tratamiento de efluentes para una planta extractora de aceite de palma. PALMAS [Internet]. 2000 [Citado el 19 de julio de 2025]; 21(1): 256-263. Disponible en: <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/793/793>
97. Preece C, Verbruggen E, Liu L Weedon J, Peñuelas J. Effects of past and current drought on the composition and diversity of soil microbial communities. Soil Biology and Biochemistry [Internet]. 2019 [Citado el 19 de julio de 2025]; 131: 28-39. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.12.022>
98. Hernández J, Abreu A, Labarca M, Faria A. Bio fertilización del cultivo de la palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.) en la fase de vivero. Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad del Zulia [Internet]. 2011 [Citado el 19 de julio de 2025]; 28(1): 57-70. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3661426>
99. Ashraf A, Zulkefly S, Adekunle M, Mohd A. Growth and Biomass yield of Oil Palm (*Elaeis guineensis*) Seedlings as Influenced by Different Rates of Vermicompost. European Journal of Engineering Research and Science [Internet]. 2017 [Citado el 19 de julio de 2025]; 2(8): 17-21. Disponible en: <https://mail.ej-eng.org/index.php/ejeng/article/view/405/188>
100. Pérez C, Juárez P, Anzaldo J, Alia I, Salcedo E, Balois R. Beneficios potenciales del biocarbón en la productividad de cultivos agrícolas. Revista mexicana de ciencias agrícolas [internet]. 2022 [Citado el 30 de octubre de 2024]; 12(4): 713-725. Disponible en : <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i4.2542>
101. Zakaria Z. Manejo de suelos y fertilizantes en plantaciones de palma aceitera en Malasia. Palmas [internet]. 1998 [Citado el 30 de octubre de 2024]; 19(especial): 207-217. Disponible en: <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/666>
102. Biocarbón y agricultura sostenible [Internet]. Ncat.org. [citado el 31 de octubre de 2024]. Disponible en: <https://attra.ncat.org/es/publication/biocarbon-y-agricultura-sostenible/>

103. Bajsa N, Morel M, Braña V, Castro S. The effect of agricultural practices on resident soil microbial communities: Focus on biocontrol and biofertilization. *Molecular Microbial Ecology of the Rhizosphere* [internet]. 2013 [Citado el 30 de octubre de 2024]; 687-700. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/9781118297674.ch65>
104. Ruíz E, Molina D. Revisión de literatura sobre beneficios asociados al uso de coberturas leguminosas en palma de aceite y otros cultivos permanentes. *Palmas* [internet]. 2014 [Citado el 30 de octubre de 2024]; 35(1): 53-64. Disponible en: <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/10947>
105. Leyva L. Buenas prácticas agrícolas: Uso de los fertilizantes nitrogenados en la minimización de la emisión de gases de efecto. *Revista Científica Ingetecno* [Internet]. 2015 [Citado el 13 de noviembre de 2024]; 4(1): 52-66. Disponible en: <https://revistas.uap.edu.pe/ojs/index.php/RCI/article/view/819/640>
106. Peña J, Grageda O, Vera J. Manejo de los fertilizantes nitrogenados en México: uso de las técnicas isotópicas (^{15}N). *Terra Latinoamericana* [internet]. 2002 [Citado el 13 de noviembre de 2024]; 20(1): 51-56. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/573/57320109.pdf>
107. Castillo E. Experiencias en riego por goteo en vivero de palma de aceite en los Llanos Orientales de Colombia. *Palmas* [internet]. 2010 [Citado el 30 de octubre de 2024]; 3(especial): 255-264. Disponible en: <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1531>
108. Rao V. Mejores prácticas en producción sostenible de aceite de palma: la experiencia de Malasia. *Palmas* [internet]. 2004 [Citado el 30 de octubre de 2024]; 25(especial): 49-65. Disponible en: <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1066>
109. Carlson K, Heilmayr R, Gibbs H, Kremen C. Effect of oil palm sustainability certification on deforestation and fire in Indonesia. *Biological Sciences* [internet]. 2017 [Citado el 30 de octubre de 2024]; 115(1): 121-126. Disponible en: <https://doi.org/10.1073/pnas.1704728114>
110. Gutiérrez E, Gutiérrez M, Ortiz C. Manejo integrado de nutrientes en sistemas agrícolas intensivos: revisión. *Revista mexicana de ciencias agrícolas* [internet]. 2015 [Citado el 13 de noviembre de 2024]; 6(1): 201-2015. Disponible en:

https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342015000100017

111. Shankar J, Chandra V, Singh D. Efficient soil microorganisms: A new dimension for sustainable agriculture and environmental development. *Agriculture, Ecosystems & Environment* [Internet]. 2011 [Citado el 19 de julio de 2025]; 140(3,4): 339- 353. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.01.017>
112. Guerra A, Mena A, Burbano M, Burbano M, Pardo L. Estudio del manejo, clasificación y recolección de fitosanitarios en el cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris*) en Sibundoy Putumayo (Colombia). *Revista de Investigación Agraria y Ambiental* [internet]. 2020 [Citado el 13 de noviembre de 2024]; 12(1): 133-152. Disponible en: <https://doi.org/10.22490/21456453.3654>
113. Pardo L, Vallecilla H, Caicedo R. Nota técnica Avances en el diagnóstico fitosanitario del cultivo de chontaduro en la zona rural de Buenaventura, Valle. *Revista Científica Sabia* [internet]. 2014 [Citado el 13 de noviembre de 2024]; 1(3): 39-53. Disponible en: <https://repositorio.unipacifico.edu.co/bitstream/handle/unipacifico/108/Avance%20en%20el%20diagnostico%20fitosanitario%20del%20cultivo%20de%20chontaduro%20en%20la%20zona%20rural%20de%20Buenaventura%20-%20Valle.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

114. Rao V. Mejores prácticas en producción sostenible de aceite de palma: la experiencia de Malasia. *Palmas* [Internet]. 2004;25(especial):49-65. Disponible en: <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1066>
115. Carlson KM, Heilmayr R, Gibbs HK, Noojipady P, Morton DC, Walker NF, et al. Effect of oil palm sustainability certification on deforestation and fire in Indonesia. *Proc Natl Acad Sci U S A* [Internet]. 2018;115(1):121-6. Disponible en: <https://doi.org/10.1073/pnas.1704728114>
116. Meijaard E, Brooks TM, Carlson KM, Slade EM, Garcia-Ulloa J, Gaveau DL, et al. Oil palm and biodiversity. A situation analysis by the IUCN Oil Palm Task Force. IUCN [Internet]. 2018. Disponible en: <https://portals.iucn.org/library/node/47954>
117. Comunidades de Madre de Dios y San Martín impulsan prácticas sostenibles frente al cambio climático. *Info región: Agencia de Prensa Ambiental* [Internet]. 2025 [citado el 20 de julio de 2025]. Disponible en: <https://info region.pe/comunidades-de-madre-de-dios-y-san-martin-impulsan-practicas-sostenibles-frente-al-cambio-climatico/>
118. Yadav R, Ramakrishna W. Biochar as an environment-friendly alternative for multiple applications. *Sustainability* [Internet]. 2023;15(18):13421. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/su151813421>
119. Jeswani HK, Azapagic A. Environmental sustainability of biofuels: A review. *Sustain Prod Consum* [Internet]. 2022;33:608-35. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.06.028>
120. Srivastava AK, Wu Q-S, Mousavi SM, Hota D. Integrated soil fertility management in fruit crops: An overview. *Int J Fruit Sci* [Internet]. 2021;21(1):413-39. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1080/15538362.2021.1895034>
121. Oni B, Oziegbe O, Olawole O. Significance of biochar application to the environment and economy. *Annals of Agricultural Sciences* [Internet]. 2019 [Citado el 07 de marzo de 2025];64(2):222–36. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.aos.2019.12.006>
122. Castillo E. Experiencias en riego por goteo en vivero de palma de aceite en los Llanos Orientales de Colombia. *Palmas* [Internet]. 2010;3(especial):255-64. Disponible en: <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/1531>
123. González Y, Ortega J, Anducho M, Mercado Y. *Bacillus subtilis* y *Trichoderma*: Características generales y su aplicación en la agricultura. *TIP* [Internet]. 2022 [Citado el 07 de marzo de 2025]; 25: e520. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-888X2022000100318

124. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. El sistema de agricultura sostenible en Tailandia que apunta a la seguridad laboral y alimentaria - Programa Asia Pacífico. 2025 [citado el 07 de marzo de 2025]; Disponible en: <https://www.bcn.cl/observatorio/asiapacifico/noticias/sistema-agricultura-sostenible-tailandia>
125. Lanzamiento oficial de campaña de fertilizantes orgánicos para enfrentar crisis [Internet]. Gob.pe. [citado el 07 de marzo de 2025]. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/midagri/noticias/607458-lanzamiento-oficial-de-campana-de-fertilizantes-organicos-para-enfrentar-criisis>
126. Karabulut F, Parray JA, Mir MA, Bhat RA, Rather GM, et al. Harnessing plant metabolome and microbiome for sustainable food production. *Micro Environ Res* [Internet]. 2021;1(01):33-5. Disponible en: <https://microenvironer.com/micro/article/view/6>
127. Pedraza et al. (2010). Microorganismos que mejoran el crecimiento de las plantas y la calidad de los suelos. Recuperado el 27/11/2024 de: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5624728.pdf>
128. Viera et al. (2021). Promoción del Uso de Microorganismos en la Agricultura: caso Proyecto Neozelandés apoyando a la agricultura limpia en Ecuador. Recuperado el 27/11/2024 de: https://www.researchgate.net/publication/352015856_Promocion_del_Uso_de_Microorganismos_en_la_Agricultura_caso_Proyecto_Neozelandes_apoyando_a_la_agricultura_limpia_en_Ecuador
129. Revelo H, Narváez C, Guanga Y. Estrategias Pedagógicas Enfocadas en la Agricultura Sostenible para Fortalecer la Valoración y Conocimiento de la Colocasia Esculenta en la Comunidad Indígena del Resguardo Gran Sabalo, Departamento de Nariño. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar* [Internet]. 2023 [Citado el 07 de marzo de 2025]; 7(5): 4150-4169. Disponible en: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i5.8020
130. Mosquera M, López D. Aceite de palma certificado sostenible: análisis de la cadena de valor. *Palmas* [Internet]. 2017 [Citado el 07 de marzo de 2025]; 38(1): 11-25. Disponible en: <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/download/12042/11996>
131. Aponte G, Rodríguez B. TENDENCIAS EN EL USO DE BIOCARBÓN COMO ACONDICIONADOR DE SUELOS. *Revista de química PUCP* [Internet]. 2021

- [Citado el 29 de noviembre de 2024]; 35(2): 44-51. Disponible en: <https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/view/24110/23244>
132. Puentes T, Rodríguez A. Impacto del biocarbón en el suelo agrícola. *Avances de Investigación En Ingeniería* [Internet]. 2021 [Citado el 29 de noviembre de 2024]; 18(2): 1-12. Disponible en: <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.2.7540>
 133. Mendes L, de Lima M, Kuramae E, Tsai S. Land-use system shapes soil bacterial communities in Southeastern Amazon region. *Applied Soil Ecology* [Internet]. 2015 [Citado el 29 de noviembre de 2024]; 95: 151-160. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.06.005>
 134. Fierer N, Jackson R. The diversity and biogeography of soil bacterial communities. *Biological Science* [Internet]. 2006 [Citado el 29 de noviembre de 2024]; 103(3): 626-631. Disponible en: <https://doi.org/10.1073/pnas.0507535103>
 135. Marschner P, Crowley D, Hong C. Development of specific rhizosphere bacterial communities in relation to plant species, nutrition and soil type. *Plant and Soil* [Internet]. 2004 [Citado el 29 de noviembre de 2024]. Disponible en: https://www.t3biosci.com/files/publications/Development_of_specific_rhizosphere_bacterial_communities_in_relation_to_plant_species.pdf
 136. Russel J, Roder H, Madsen J, Sorensen S. Antagonism correlates with metabolic similarity in diverse bacteria. *Biological Sciences* [Internet]. 2017 [Citado el 29 de noviembre de 2024]; 114(40): 10684-10688. Disponible en: <https://doi.org/10.1073/pnas.1706016114>
 137. Montoya I, Montoya L, Lowy P. Oportunidades para la actividad cacaotera en el municipio de Tumaco, Nariño, Colombia. *Entramado* [internet]. 2015 [Citado el 29 de noviembre de 2024]; 11(1): 48-59. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1900-38032015000100004&script=sci_arttext
 138. Merino B. Operaciones de erradicación e interdicción y reducción de cultivos de coca en Perú 2011-2016. *Revista Gobierno y Gestión Pública* [internet]. 2019 [Citado el 29 de diciembre de 2024]; 5(1): 58-82. Disponible en: <https://portalrevistas.aulavirtualusmp.pe/index.php/RevistaGobiernoG/article/view/2371/2821>

139. Basiron Y, Darus A. La industria de la palma de aceite de contaminación a cero desechos. Palmas [Internet]. 1997 [Citado el 29 de noviembre de 2024]; 18(1): 51-65. Disponible en: <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/572>
140. Zavala C, Pretell V, Verastegui J, Ramirez A. Estimación del potencial energético del gas pobre a partir de la gasificación de cáscara de cacao y racimos de frutos vacíos de palma aceitera. Información tecnológica [Internet]. 2021 [Citado el 29 de noviembre de 2024]; 32(2): 143-150. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642021000200143>
141. Prager M, Sanclemente O, Sánchez M, Miller J, Sánchez D. ABONOS VERDES: TECNOLOGÍA PARA EL MANEJO AGROECOLÓGICO DE LOS CULTIVOS. Agroecología [Internet]. 2012 [Citado el 29 de noviembre de 2024]; 7: 53-62. Disponible en: <https://revistas.um.es/agroecologia/article/view/170991/1462>
142. World Resources Institute. Herramienta de riesgo – Perú [Internet]. Washington, DC: World Resources Institute; c2024 [Citado el 3 de septiembre de 2025]. Disponible en: <https://forestpolicy.org/risk-tool/country/peru>
143. Center for Climate Crime Analysis. Fighting illegal deforestation caused by palm oil in Peru [Internet]. Center for Climate Crime Analysis; [Citado el 03 de septiembre de 2025]. Disponible en: <https://climatecrimeanalysis.org/project/fighting-illegal-deforestation-caused-by-palm-oil-in-peru/>
144. Bennett A, Ravikumar A, Cronkleton P. The effects of rural development policy on land rights distribution and land use scenarios: The case of oil palm in the Peruvian Amazon. Land Use Policy [internet]. 2018 [Citado el 03 de septiembre de 2025]; 70: 84–93. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.10.011>
145. Astuti R, Miller MA, McGregor A, Sukmara MDP, Saputra W, Sulistyanto, Taylor D. Making illegality visible: The governance dilemmas created by visualising illegal palm oil plantations in Central Kalimantan, Indonesia. Land Use Policy [internet]. 2022 [Citado el 03 de septiembre de 2025]; 114:105942. Disponible en : <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105942>
146. Associated Press. Amendment to Peru law raises fears of Amazon rainforest destruction [Internet]. Bogotá: The Associated Press; 15 Apr 2025 [Citado el 03 de septiembre de 2025]. Disponible en: <https://apnews.com/article/peru-forest-amendment-indigenous-law-constitutional-court-deforestation-6e67fa5298ba45eabece3471e1bbf793>
147. Global Canopy. Sustainable Palm Oil Production in Peru [Internet]. Unlocking Forest Finance project brief; [Citado el 03 de septiembre de 2025]. Disponible en: <https://www.international-climate-initiative.com/PUBLICATION95-1>
148. Center for International Forestry Research (CIFOR). Palm oil’s complex land conflicts [Internet]. Forests News; 13 Mar 2019 [Citado el 03 de septiembre de 2025]. Disponible en : <https://forestsnews.cifor.org/60101/palm-oils-complex-land-conflicts>
149. Bennett A, Ravikumar A, McDermott C, Malhi Y. Smallholder Oil Palm Production in the Peruvian Amazon: Rethinking the Promise of Associations and Partnerships for Economically Sustainable Livelihoods. Frontiers in Forests and Global Change

- [Internet]. 2019 [Citado el 03 de septiembre de 2025]; 2:14. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/ffgc.2019.00014>
150. McCarthy N. A Spotlight on Exponential Peruvian Palm Oil Growth: ESG Risks for Cargill Subsidiary, Cargill Americas Peru SPL. Climate Advisers [Internet]. 2020 [Citado el 03 de septiembre de 2025]. Disponible en: <https://www.climateadvisers.org/insightsfeed/a-spotlight-on-exponential-peruvian-palm-oil-growth-esg-risks-for-cargill-subsiidiary-cargill-americas-peru-spl/>

Anexos

Anexo 1: Artículos seleccionados en la revisión sistemática

| Nº | Autor(es) | Año | Título del artículo | Fuente | Objetivo principal | Principales hallazgos |
|----|--------------------------------|------|--|--|---|--|
| 1 | Murphy, Goggin y Paterson [73] | 2021 | Oil palm in the 2020s and beyond: challenges and solutions | CABI Agric Biosci | Analizar los desafíos y soluciones en la producción de palma aceitera. | Destaca la necesidad de certificaciones sostenibles como RSPO para reducir el impacto ambiental [73]. |
| 2 | Hassan, et al [74] | 2024 | Palm oil expansion in Malaysia and its countermeasures through policy window and biorefinery approach | Environ Sci Policy | Evaluar las políticas de expansión de palma en Malasia. | Propone estrategias como biorefinería y certificaciones para mitigar impactos [74]. |
| 3 | Yadav y Ramakrishna [75] | 2023 | Biochar as an environment-friendly alternative for multiple applications | Sustainability | Analizar el uso del biocarbón en la agricultura. | Resalta la capacidad del biocarbón para mejorar la fertilidad del suelo y reducir emisiones de CO ₂ [75]. |
| 4 | Jeswani [76] | 2022 | Environmental sustainability of negative emissions technologies: A review | Sustainable Production and Consumption | Disminuir los niveles de huella de carbono. | Resalta las diferentes formas de como implementar el biocarbon al suelo, así mismo como está técnica contribuye a la mitigación del cambio climático [76]. |
| 5 | Stewart [77] | 2020 | Efficacy of organic amendments used in containerized plant production: Part 2 – Non-compost-based amendments | Sci Hortic | Examinar la efectividad de enmiendas orgánicas en el cultivos, incluyendo biocarbón y compost, en la productividad de cultivos. | Demuestra que las enmiendas orgánicas mejoran la calidad del suelo y el crecimiento de cultivos, reduciendo la necesidad de fertilizantes sintéticos [77]. |

| | | | | | | |
|----|----------------------------------|------|--|-----------------------------------|---|--|
| 6 | Srivastava, et al [78] | 2021 | Integrated soil fertility management in fruit crops: An overview | Int J Fruit Sci | Analizar el manejo integrado de fertilidad del suelo en cultivos y su impacto en la productividad del suelo. | Indica que la combinación de fertilizantes orgánicos e inorgánicos optimiza la absorción de nutrientes y mejora la salud del suelo [78]. |
| 7 | Akande [79] | 2020 | Forest ecosystem potentials in Nigeria: Opportunities for green economy in the 21st century | Commonwealth Forestry Association | Analizar el papel de las certificaciones sostenibles como RSPO en la promoción de un enfoque de economía verde en el sector agroindustrial. | Las certificaciones como RSPO y el concepto de economía verde pueden reducir la deforestación, optimizar el uso de recursos naturales y generar empleos sostenibles. Se destaca la importancia de sistemas de pago por servicios ambientales y certificaciones forestales como el Forest Stewardship Council para fomentar una producción más responsable y sustentable [79]. El desarrollo del microbioma en la producción vegetal temprana y estableció canales informáticos para el diseño del microbioma central con el fin de optimizar las interacciones entre plantas y microorganismos autóctonos [80]. |
| 8 | Karabulut, Parray y Mir [80] | 2021 | Emerging trends for Harnessing plant metabolome and microbiome for sustainable food Production | Micro environer | Analizar el uso de microbioma en las plantas para una producción sostenible de cultivos. | El desarrollo del microbioma en la producción vegetal temprana y estableció canales informáticos para el diseño del microbioma central con el fin de optimizar las interacciones entre plantas y microorganismos autóctonos [80]. |
| 9 | Giller, et al [81] | 2022 | IFAD Research Series 83: The Future of Agriculture: Who Will Produce Our Food? | Ag Econ Search | Analizar el futuro de las producción de los cultivos en general. | Resalta la participación de la política para el desarrollo de la agricultura a pequeña y gran escala [81]. |
| 10 | Noordwijk, Khasannah y Dewi [82] | 2016 | Can intensification reduce biofuel emissions intensity through optimized fertilizer use? Theory and the case of oil palm in Indonesia. | Glob Change Biol Bioenergy | Conocer la eficiencia a detalle de la optimización del uso de fertilizantes. | Aumentar la producción mediante un mayor uso de fertilizantes del 67% actual al 80% de los rendimientos alcanzables no reduciría las huellas en las condiciones de producción actuales [82]. |

| | | | | | | |
|----|---------------------|------|---|----------------------------|--|--|
| 11 | Davis, et al [83] | 2013 | Management swing potential for bioenergy crops | Glob Change Biol Bioenergy | Evaluar estrategias sostenibles en el manejo de fertilizantes y protección de cultivos en el sector palmicultor. | La estrategia de fertilizantes de precisión optimiza la aplicación de fertilizantes nitrogenados, reduciendo el uso de agroquímicos y las emisiones de gases de efecto invernadero. Los sistemas agroforestales combinan palma aceitera con otros cultivos y árboles, promoviendo la biodiversidad y el secuestro de carbono. El uso de biopesticidas sustituye pesticidas químicos por alternativas biológicas, disminuyendo la dependencia de productos sintéticos y su huella de carbono, aunque su efectividad depende del contexto y las plagas presentes [83]. |
| 12 | Geonadi, et al [84] | 2021 | Assessing land suitability and soil organic carbon stocks as two keys to achieving sustainability of oil palm (<i>Elaeis guineensis</i> Jacq.) | Sarhad J Agric | Obtener la sostenibilidad del cultivo de palma aceitera a través de evaluación de la tierra y uso de carbono orgánico. | La RSPO y la ISPO funcionaron para minimizar el efecto negativo de la producción de palma aceitera en el medio ambiente y la comunidad social [84]. |
| 13 | Rodriguez [85] | 2007 | Desempeño ambiental del sector palmero en Colombia | Palmas | Conocer el desempeño ambiental del sector palmero en Colombia. | Una de las recomendaciones más fuertes en lo que se refiere a las plantas extractoras impulsar como un propósito el moverse hacia el objetivo de cero emisiones y cero desperdicios [85]. |

| | | | | | | |
|----|-------------------------------|------|---|---|---|--|
| 14 | Rodriguez y Van [86] | 2023 | El desempeño ambiental del sector palmicultor Colombiano : una década de avances y un futuro promisorio | Palmas | Analizar la evolución, los retos y el futuro de la gestión ambiental en la agroindustria de la palma de aceite en Colombia, tomando en cuenta su efecto en los ecosistemas forestales, los recursos hídricos, el suelo, la biodiversidad y la calidad del aire. | Destaca el uso de tecnologías limpias, medidas de mitigación y biocidas específicos para reducir el impacto ambiental en la agroindustria de la palma de aceite en Colombia. Además, resalta la importancia del control de plagas y la gestión sostenible de los recursos naturales para mejorar la competitividad del sector [86]. |
| 15 | Morales, Neira y Becerra [87] | 2017 | Aplicación de mejores prácticas fitosanitarias en el cultivo de la palma de aceite | Cenipalma | Identificar la aplicación adecuada de prácticas fitosanitarias óptimas en el cultivo de palma de aceite. | Medidas fitosanitarias de control oficial de plagas como "Anillo Rojo", "Marchitez letal" son efectivas para el desarrollo correcto de los cultivos. [87]. |
| 16 | Romero, et al [88] | 2022 | Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero de un modelo de negocio sostenible de palma aceitera en la región de Ucayali, Perú | Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) | Evaluar las estrategias de mitigación de gases de efecto invernadero (GEI) en diferentes modelos productivos de palma aceitera en Ucayali. | Se identificaron prácticas clave para reducir las emisiones de GEI, destacando acuerdos de cero deforestaciones, el uso de racimos de fruta vacía (RFV) como abono y la siembra de coberturas leguminosas. Se concluyó que evitar la conversión de bosques primarios y fomentar la recuperación de suelos degradados puede reducir significativamente la huella de carbono del cultivo [88]. |