



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Politécnica Superior de Gandia

OBTENCIÓN DE VARIABLES AGROCLIMÁTICAS PARA
MODELIZAR LA DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DE LA
PALMERA DEL ACEITE MEDIANTE GOOGLE EARTH
ENGINE y PYTHON

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ciencias Ambientales

AUTOR/A: Artigas Vilches, Samuel

Tutor/a: Marti Gavila, Jesus

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE GANDIA

OBTENCIÓN DE VARIABLES
AGROCLIMÁTICAS PARA MODELIZAR LA
DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DE LA
PALMERA DEL ACEITE MEDIANTE
GOOGLE EARTH ENGINE Y PYTHON

TRABAJO FINAL DE GRADO

**Autor: SAMUEL ARTIGAS
VILCHES**

Tutor: JESÚS MARTI GAVILA

*Universidad Politécnica de
Valencia. Campus de Gandía.
2023*

Agradecimientos

Me gustaría agradecer la ayuda y guía obtenida por parte del Dr. Jesús Martí, del Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría de la Universidad Politécnica de Valencia. Sus consejos y recomendaciones han sido útiles para la realización del estudio.

Índice

Resumen.....	1
Abstract.....	2
Introducción.....	3
1. Planteamiento del problema.....	5
1.1 Descripción del problema.....	5
1.2 Pregunta Problema.....	6
1.3 Etapas o fases del TFG.....	6
2. Objetivos.....	7
2.1 Objetivo principal.....	7
2.2 Objetivos secundarios.....	7
3. Justificación y limitaciones.....	7
3.1 Justificación.....	7
3.2 Limitaciones.....	8
4. Marco teórico.....	11
4.1 Conceptos generales.....	11
4.2. Clasificación de los biocombustibles.....	12
4.3. El precio del petróleo y situación actual.....	14
4.4 Plantaciones energéticas y biodiesel.....	16
4.5 La palma aceitera (<i>Elaeis guineensis</i>).....	18
4.6 Características energéticas del aceite de palma.....	22
4.7 Procesos y tecnologías para la extracción de aceite de palma y obtención del biodiesel.....	22
5. Metodología.....	26
5.1 Google Earth Engine como herramienta de desarrollo.....	26
5.2 Python.....	30
6.Resultados.....	32
6.1 Análisis e interpretación de valores climáticos, edáficos y topográficos que requieren las plantaciones de palma aceitera.....	32
6.2 Establecimiento de zonas óptimas de la Península Ibérica para el cultivo de la palma aceitera.....	37
7. Discusión.....	41
8. Conclusiones.....	41
Bibliografía.....	43

Resumen

La historia de los biocombustibles desde principios de los años 70 ha ido evolucionando y sigue haciéndolo hacia un futuro en el que la sustitución de los combustibles fósiles es cada vez más posible gracias a los avances tecnológicos que ha habido estas últimas décadas. La situación de crisis mundial existente en la actualidad es un contexto que debemos aprovechar para hacer una reflexión sobre las fuentes energéticas del futuro y acelerar la investigación de nuevos y eficientes biocombustibles. Por ello, en este estudio se ha llevado a cabo un análisis de la producción de biodiesel a partir de la palma aceitera (*Elaeis guineensis*), un biocombustible con un alto potencial para sustituir a los actuales combustibles fósiles.

Así pues, el **principal objetivo del presente estudio ha sido la determinación de zonas idóneas para el cultivo de la palma aceitera en la Península Ibérica, teniendo en cuenta los datos topográficos, climáticos y edáficos de las zonas colombianas y nigerianas donde crece dicha especie vegetal en forma de plantaciones.**

Los datos de referencia analizados han sido fundamentalmente diferentes variables agroclimáticas como la temperatura, la humedad, la precipitación, el pH del suelo, la altitud, la evotranspiración y la pendiente del terreno. Estos datos se han obtenido de forma directa de la plataforma de Google Earth Engine (GEE) y sirven para poder determinar la idoneidad de cada zona representada en la plataforma y su posterior caracterización.

Con los datos se ha realizado una reclasificación de valores en dos grupos y mediante el lenguaje de programación Python se han obtenido mapas de la Península Ibérica en los que se muestran aquellas zonas que cumplen con las condiciones de cultivo de la palma aceitera.

De esta manera, el trabajo realizado puede tener aplicaciones diversas en los ámbitos de la agricultura, la producción de biocombustible a partir del aceite de palma y el desarrollo de nuevas técnicas de producción sostenible.

Palabras clave: Biocombustibles, combustible fósil, palma aceitera, *Elaeis guineensis*, biodiésel, Google Earth Engine.

Abstract

The history of biofuels since the early 70s has evolved and continues to do towards a future where the replacement of fossil fuels is increasingly possible thanks to the technological advances that have occurred in recent decades. The global crisis we are living is a perfect moment for doing a global reflection about new and efficient ways of producing biofuels.

This study consist in an analysis of the production of biodiesel from oil palm (*Elaeis guineensis*). The main objective of the study is identify the better Spanish terrestrial locations where we could develope oil palm plantations. The determination of these spaces will be carried out through the analysis of different agroclimatic variables such as temperature, soil humidity, precipitations, soil pH, altitude, evotranspiration and slope of the terrain. Using all these data and developing with Python a reclassification method we have obtained and interpreted some results.

On the one hand, the data used for the development of the project had been obtained directly from Google Earth Engine (GEE) platform. On the other hand, the programming language used in this study has been Python with the Geemap library. These data will allow us to obtain different climatological, soil and topographical variables that can determine the suitability of each area represented on the platform and its subsequent characterization.

This study is usefull in diferents areas such as agriculture, oil palm biofuels development and production and exploration of new ways of sustainable production.

Keywords: Biofuels, fossil fuel, oil palm, *Elaeis guineensis*, biodiesel, Google Earth Engine.

Introducción

El uso de biocombustibles data de la época en que la humanidad descubrió cómo hacer fuego y se valió de la madera que se quemaba para cocinar o para calentarse. Otro claro ejemplo fue el uso de distintos tipos de aceites vegetales que se quemaban para alumbrar las calles en el siglo XVIII, método que acabó sustituyéndose por el uso de queroseno a finales de siglo. Ahora bien, hay que esperar hasta el siglo XX para que tenga lugar la revolución más importante en el uso de los combustibles, momento marcado con la aparición de una mayor disponibilidad de petróleo y unos resultados más favorables que los obtenidos anteriormente con otros métodos y materiales. Los hidrocarburos fósiles se convirtieron en los combustibles dominantes en la época hasta la actualidad.

De manera paralela al incremento en el uso del petróleo, a finales del siglo XX, empezó a aumentar la preocupación por sus consecuencias perjudiciales para el medio ambiente; consecuencias derivadas de su extracción, transporte y utilización. Ello, añadido a su disponibilidad cada vez más reducida hizo que proliferasen los estudios científicos sobre sostenibilidad energética a gran escala. El aumento de estudios sobre sostenibilidad y una mayor preocupación social por la conservación de la naturaleza han permitido un mayor desarrollo de los biocombustibles.

Biocombustible es todo combustible producido directamente de la biomasa o mediante su transformación y que puede sustituir a combustibles de origen fósil (Alejos, C. 2015).

La clasificación de los biocombustibles se hace a partir de la materia orgánica de la que provienen, así pues, encontramos: biocombustibles de primera, segunda y tercera generación.

- Biocombustibles de 1ª generación; son aquellos provenientes de la biomasa, especialmente de cultivos agrícolas (maíz, girasol o soja), donde mediante procesos como la fermentación en caso de los azúcares, o la transesterificación en el caso de las grasas, se puede obtener biodiesel. (Patricio, C., 2008)
- Biocombustibles de 2ª generación; se obtienen generalmente de las materias primas de deshechos o que no son comestibles para los seres humanos, como residuos forestales o agrícolas. Estos residuos pueden ser convertidos en biocombustible mediante una vía bioquímica (uso de microorganismos) o una vía termoquímica (utilización de altas presiones y temperaturas, pirolisis). (Antenor, C. 2017)

- Biocombustibles de 3ª generación; provienen de organismos que pueden producir su propio alimento a partir de energía solar y CO₂, entre ellos algas, que se pueden cultivar en reactores fotoquímicos o en piletones al aire libre. Luego de secarlas, se extrae el aceite que contienen sus células y se lo transforma en biocombustible por alguno de los métodos anteriores. (Daniel, F., Soledad, M. y Armando, M. 2016)

La producción de biocombustibles actual está encasillada en un contexto que presenta una serie de desafíos tanto económicos como ambientales, así como la relación con la regulabilidad de provisión de materias primas. La creencia de que se podía obtener biocombustible de forma ilimitada chocaba con el crecimiento de la población mundial y el aumento de la cantidad de alimentos y recursos necesarios para sostener este crecimiento. Esta problemática se traduce en un problema de asignación de las tierras, es decir, si las tierras se asignan a la obtención de alimentos o a la obtención de energía. Sin embargo, existen situaciones en las que ambas opciones pueden complementar el uso alimentario y la obtención de materias para biocombustibles. (Serna, F., Barrera, L. y Montiel, H. 2011)

El futuro de los biocombustibles depende de sus costes de producción y de la relación de estos con los de los combustibles fósiles y los de otras formas de energías de fuentes renovables. Dejando de lado las políticas, un elemento crucial en los últimos tiempos es la subida de los precios internacionales del petróleo y el gas, que ponen en seria desventaja a corto y largo plazo a los combustibles procedente de los hidrocarburos.

El ámbito de los biocombustibles está en continua evolución y mejora. Es por ello por lo que se necesitan cada vez más estudios y herramientas que permitan mejorar su producción y reducir costes. Una de estas herramientas son los Sistemas de Información Geográfica (SIG) como por ejemplo la plataforma *Google Earth Engine*® (GEE) creada por Google® y que ha sido utilizada en este estudio. Se trata de una plataforma de análisis geoespacial basada en la nube que permite a los usuarios visualizar y analizar imágenes satelitales de nuestro planeta. Los científicos y las organizaciones sin ánimo de lucro utilizan Earth Engine en una gran variedad de ámbitos como la investigación de sensores remotos, la predicción de brotes de enfermedades o la gestión de recursos naturales.

1. Planteamiento del problema

El estudio que a continuación se presenta se basa en la problemática de la sustitución de los combustibles fósiles, como el petróleo o el gas, por los diferentes tipos de biocombustibles existentes. Los biocombustibles se consideran más respetuosos con el medioambiente ya que son biodegradables y tienden a ser más sostenibles. Ahora bien, presentan otras limitaciones como el uso excesivo de agua y suelo, recursos esenciales que podrían ser destinados a otros fines como la obtención de alimentos.

1.1 Descripción del problema

Tal y como se ha mencionado, la principal problemática existente en la producción de biocombustibles está en la necesidad de utilización de grandes cantidades de recursos naturales como el suelo y el agua, recursos que podrían ser destinados a la obtención de alimentos.

En la actualidad existen 8.300 millones de hectáreas de bosques y pastizales y 1.600 millones de zonas cultivadas. Sin tener en cuenta estas zonas de bosques y áreas, la superficie que podría ser destinada a los cultivos serían entre 250 y 800 millones de hectáreas. Parte de esta superficie puede ser destinada a la producción de las materias primas necesarias para la elaboración de biocombustibles. Ahora bien, esto puede originar problemáticas como es el caso del desplazamiento de la producción de soja debido al gran incremento de plantaciones de maíz en los EE. UU. para obtener etanol.

Así pues, es necesario tener en cuenta estos cambios directos e indirectos. Es probable que la expansión de los cultivos de materias primas para obtener biocombustibles desempeñe un papel fundamental a la hora de satisfacer el aumento de la demanda de biocombustibles en el futuro, pero hay que tener en cuenta que la intensificación del uso de la tierra tendrá que complementar a esta opción con el fin de poder mantener este desarrollo a largo plazo.

Así pues, la producción de biocombustibles afecta a muchos ámbitos que hay que tener en cuenta; medio ambiente, sociedad, seguridad alimentaria, rentabilidad, economía. Es importante encontrar un equilibrio entre todas estas factores, cuestión nada sencilla. Al tratarse de un tema tan complejo, es necesario un análisis de la información para poder determinar la mejor opción para un desarrollo sostenible con el medioambiente y poder mitigar las elevadas emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) a la atmosfera.

1.2 Pregunta Problema

¿Cuáles son las zonas más idóneas para el desarrollo de plantaciones de palma aceitera en la Península Ibérica?

1.3 Etapas o fases del TFG

El desarrollo del presente Trabajo de Fin de Grado ha seguido las siguientes etapas;

1. Primera etapa; determinación de los objetivos del estudio. En primer lugar, se plantearon el objetivo principal y objetivos secundarios del estudio. Una vez se determinaron dichos objetivos se procedió a la búsqueda de información sobre el tema. En el apartado 2 se exponen estos objetivos.
2. Segunda etapa; búsqueda de información. La información se obtuvo a partir de artículos científicos y libros de referencia. También a partir de diversos videos de páginas web que exponen información relevante sobre las características del suelo, tipos de vegetación existente, climatología y meteorología de la zona, historia de los biocombustibles y problemática actual sobre el tema.

Además se ha obtenido información a partir de la realización del curso online “Introducción a Google Earth Engine con Python” de la plataforma GitHub. Con la información recopilada se ha contextualizado el estudio y redactado el marco teórico del trabajo.

3. Tercera etapa; realización práctica del estudio. Mediante Google Earth Engine se obtuvieron las variables agroclimáticas y Terraclime que posteriormente se utilizarían para el desarrollo del código Python.
4. Cuarta etapa; obtención e interpretación de resultados y extracción de conclusiones que en el presente trabajo se muestran.

2. Objetivos

2.1 Objetivo principal

Determinación de zonas idóneas para el cultivo de la palma aceitera en la Península Ibérica, teniendo en cuenta los datos topográficos, climáticos y edáficos de las zonas colombianas y nigerianas donde existen amplias plantaciones dicha especie vegetal.

2.2 Objetivos secundarios

- ✓ Clasificar los biocombustibles de acuerdo con la materia prima y tecnología utilizada.
- ✓ Determinar las ventajas y desventajas obtenidas al reemplazar combustibles fósiles por biocombustibles (Biodiesel).
- ✓ Obtener las variables agroclimáticas mediante Sistemas de Información Geográfica.
- ✓ Trasladar el rango de valores y localizar en la Península Ibérica las zonas que se aproximan más a las características óptimas para el desarrollo de la palma aceitera.

3. Justificación y limitaciones

3.1 Justificación

La principal justificación para el desarrollo de los biocombustibles se refiere a la búsqueda de alternativas frente al aumento del precio del petróleo y de sus derivados. Sin embargo, cuando se profundiza en la discusión surgen otras muchas razones que estarían motivando su desarrollo.

En primer lugar, existe la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Esto ha motivado a muchos países a buscar nuevas fuentes de energía, con un número menor de emisiones de GEI asociados en comparación a las provenientes de los combustibles fósiles. La bioenergía y en especial los biocombustibles se presentan como alternativas viables para satisfacer sus necesidades energéticas al tiempo que cumplen con distintas metas en la reducción de las emisiones.

Otra de las razones es la seguridad energética, y es que los biocombustibles también constituyen un componente estratégico de la política energética. Los biocombustibles

tendrán un papel fundamental en las proyecciones mundiales de oferta y demanda de energía debido al creciente número de conflictos relacionados con el control y escasez de las actuales fuentes. Por ello, hoy en día la mayoría de los países poseen políticas para promover el desarrollo del mercado de los biocombustibles a lo largo de toda la cadena de producción y comercialización.

La industria de los biocombustibles se enfrenta a estrictas exigencias de sostenibilidad para su desarrollo. En este sentido ha habido interés en definir indicadores de sostenibilidad que permitan marcar el rumbo del desarrollo del sector de la bioenergía, considerando los impactos ambientales, sociales y económicos y los de seguridad energética.

Los biocombustibles han sido descritos como una amenaza para la seguridad alimentaria muchas veces a lo largo de su historia, hecho que ha producido una serie de estudios y proyectos con el fin de profundizar las dinámicas que los vinculan a los usos que se dan al suelo. Estos estudios se han llevado a cabo de forma más enfática en aquellos países que son importadores netos de alimentos y de combustibles, pues son más vulnerables (CEPAL, 2012)

Por último, la producción y uso de biocombustibles debería mejorar el desarrollo social y económico de aquellas regiones o países que apuesten por ellos. La producción de biocombustibles es una opción que puede aportar mucho a la economía interna de un país, cambiando la importación de combustibles del extranjero e implementando una producción más limpia como el biodiesel o el bioetanol.

3.2 Limitaciones

El desarrollo y comercialización de biocombustibles presenta actualmente las siguientes limitaciones;

- Primera limitación; elevado coste. La primera limitación es el elevado coste de fabricación debido a los altos precios que tienen las materias primas necesarias para la obtención del biocombustible. Por ejemplo, el coste de producción de los biocombustibles avanzados es actualmente más alto, en torno a 1.300€ /tep (euros/tonelada equivalente de petróleo), que los combustibles fósiles (540 €/tep) como promedio de cotización para el diésel 2018-2019 (del Campo Colmenar, I s/f).

- Segunda limitación; falta de desarrollo de nuevas tecnologías. El elevado precio de producción de los biocombustibles en relación al petróleo limita en cierta medida el desarrollo de tecnologías asociadas a su producción. Además, hay que tener en cuenta que desde el año 2012 existe un impuesto sobre los hidrocarburos, lo que hace que actualmente el precio sea más elevado y que disminuya el número de interesados en el desarrollo de nuevas tecnologías que ayuden al aumento de la cantidad de biocombustibles.

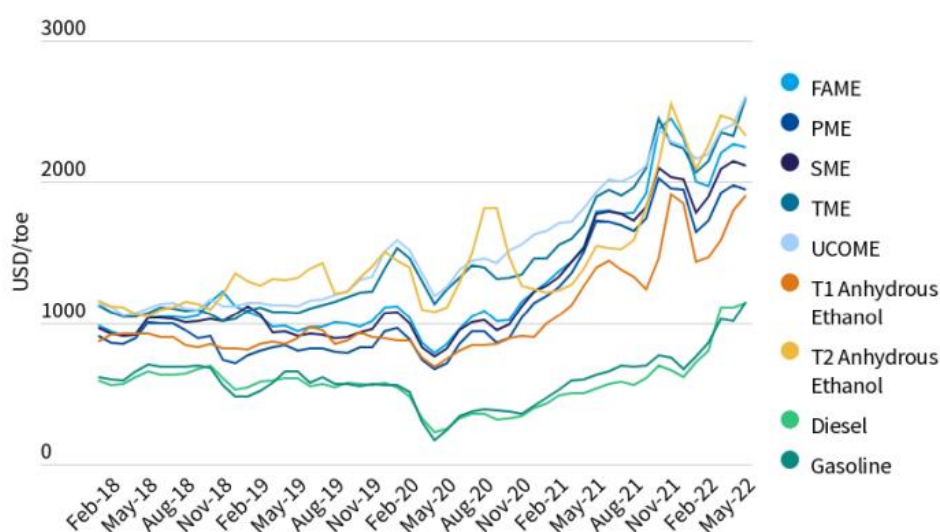


Figura 1. Evolución reciente de los precios mayoristas (USD/tep) en los principales combustibles fósiles y biocombustibles (FAME: ésteres metílicos de ácidos grasos, PME: éster metílico de palma, SME: éster metílico de soja, TME: éster metílico de sebo, UCOME: Éster metílico de aceite de cocina usado, T1: Importaciones de bioetanol de la UE, T2: Producción nacional de bioetanol de la UEI). Fuente: Maik Marahrens, 2022, Billions wasted on biofuels. Biofuels are a harmful and expensive distraction to road transport decarbonisation.

- Tercera limitación; escasez de lugares de repostaje. Las biogasolineras son estaciones de servicio normales que introducen los nuevos biocombustibles (sobre todo biodiesel y bioetanol) con alguna de las distintas mezclas. La limitación actualmente es la escasez de zonas donde se distribuye estos biocombustibles y es que en España solamente existen unas 420 estaciones donde se puede repostar **biodiésel**, donde los precios oscilan entre los 0,879-1,0075 euros por litro dependiendo de la comunidad autónoma. Por otro lado, solamente existen 5 zonas en toda España donde se puede comprar **bioetanol** (Etanol E85), concentradas todas ellas en el norte (*Gasolineras con etanol e85 en España, Mapa y Lista.* (s. f.).

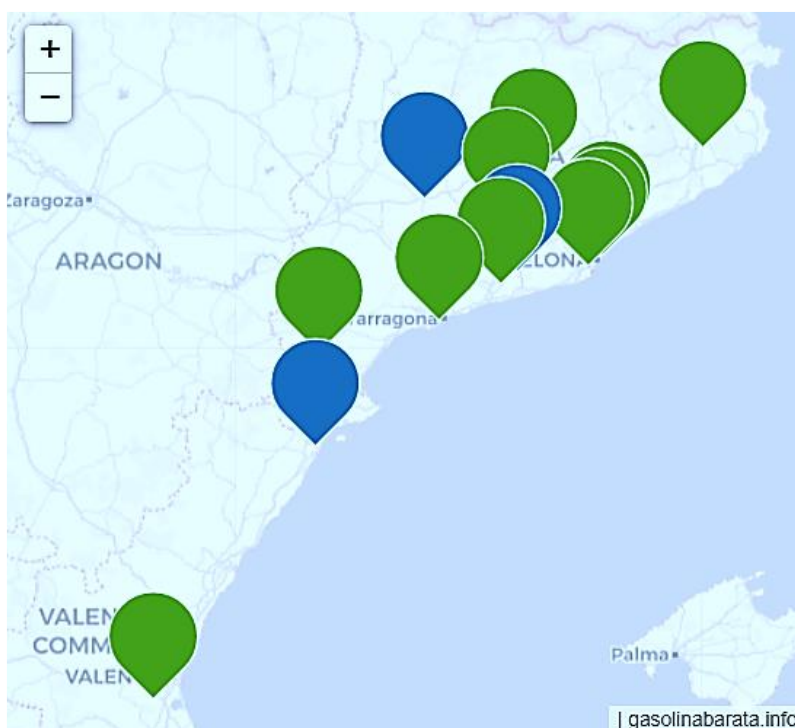
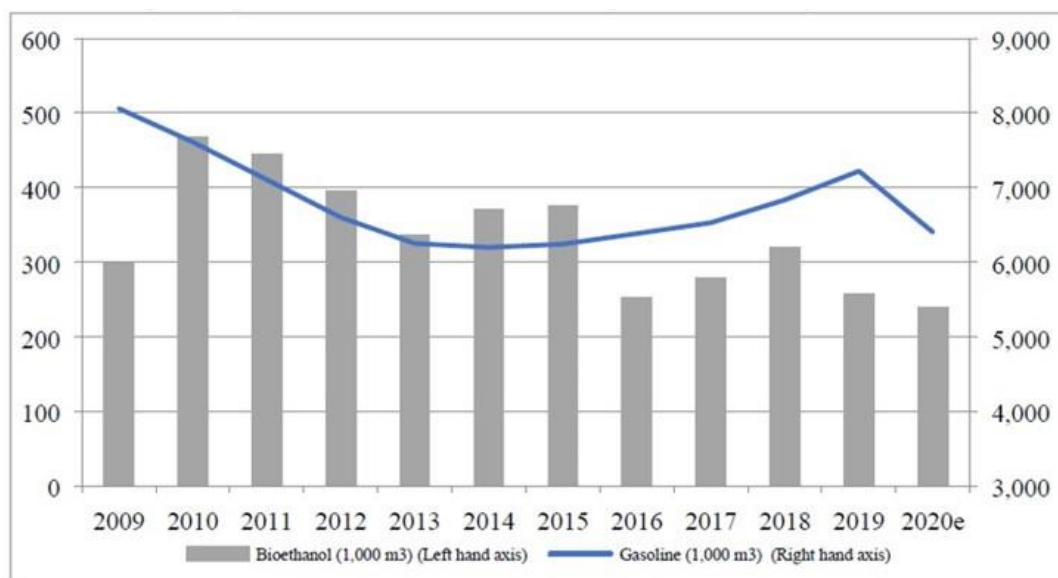


Figura 2. Mapa de gasolineras con biodiesel en la zona este de la Península Ibérica. Azul: Gasolineras. Verde: Gasolineras un 5% más baratas que el precio medio de la comunidad. Fuente: gasolinabarata.info, 2023, GasolinaBarata (<https://gasolinabarata.info/gasolineras-biodiesel/>)



Consumo de gasolina (derecha) y bioetanol (izquierda) en España (fuente CNMC)

Figura 3. Consumo de gasolina y bioetanol en España. Fuente: Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia (CNMC), 2020, (<https://bio-e.es/biocambustibles/>).

- Cuarta limitación; factores naturales climáticos, hídricos, edáficos y topográficos.
Se deben tener en cuenta una serie de factores a la hora de elegir la región donde implantar las plantaciones como son el clima, la cantidad de agua disponible, el tipo de suelo o la topografía. El clima es uno de los factores más limitantes ya que existen regiones con climas muy fríos o cálidos donde no es posible llevar a cabo cultivos para la obtención de biocombustibles. También la disponibilidad de agua ya que una baja cantidad de agua implica una menor producción de materia prima. El factor de tipo suelo también es importante ya que cada especie vegetal está adaptada a unos valores edáficos determinados (tipo de suelo, pH, materia orgánica, etc.).
- Quinta limitación; protección del medio ambiente. Por otro lado, la invasión de los espacios seleccionados supondría una desaparición o cambio de la biodiversidad de la zona, lo que podría causar graves daños en los ecosistemas locales. Además, el uso de productos químicos como fertilizantes o biocidas tiene consecuencias negativas para las aguas subterráneas y superficiales.

4. Marco teórico

4.1 Conceptos generales

En primer lugar, se exponen algunas definiciones de conceptos importantes para el presente estudio como son los conceptos de **energía renovable, biomasa y biocombustible**.

Según las Naciones Unidas (UN), las energías renovables son “un tipo de energías derivadas de fuentes naturales que llegan a reponerse más rápido de lo que pueden consumirse” (UN, 2022). Por otro lado, la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) define la biomasa como aquel material de origen biológico que excluye al material incluido en formaciones geológicas y que se transforma en fósil. Las fuentes de biomasa incluyen cultivos energéticos, desechos y subproductos agrícolas y forestales, estiércol o biomasa microbiana. (FAO, 2011)

La Real Academia Española (RAE) define biocombustible como “combustible obtenido mediante el tratamiento físico o químico de materia vegetal o de residuos orgánicos”.

4.2. Clasificación de los biocombustibles

A continuación, se exponen los 3 tipos existentes de biocombustibles; biocombustibles de 1ª, 2ª y 3ª generación. Se trata de un sistema de clasificación basado en la procedencia de las materias primas a partir de las cuales son fabricados.

- Los **biocombustibles de primera generación** son obtenidos a partir de las materias primas convencionales que también se utilizan para el sector alimentario. Ello hace que este tipo de biocombustibles sean catalogados como problemáticos a nivel social ya que utilizan las mismas materias primas necesarias para la alimentación. (Cortés-Sánchez, MD. et al. 2019). Por ello reciben numerosas críticas y parte de la comunidad científica los valora negativamente, y más en el contexto actual de incremento del precio de los alimentos (Figura. 4).



Figura 4. Índice de la FAO para los precios de los alimentos, en términos nominales y reales. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2023, (<https://www.fao.org/worldfoodsituation/foodpricesindex/es/>)

Además, hay que tener en cuenta que estos biocombustibles originados a partir de cultivos de alimentos no pueden cubrir la demanda, ya que son insostenibles, ineficientes e inadecuados para suplir las crecientes necesidades de la población. (Ullah *et al.*, 2015).

- Los **biocombustibles de segunda generación** se producen generalmente a partir de materias primas no comestibles, tales como aceites vegetales, grasas residuales, cultivos no alimentarios o materia prima lignocelulósica derivada de los residuos forestales y agrícolas. Pueden ser considerados como una alternativa prometedora ya que existe una amplia gama de materias disponibles

y las materias primas son relativamente baratas. Además, hay que destacar el caso de los aceites vegetales no comestibles, que representan una de las materias más importantes para la producción de biocombustibles de segunda generación y que además no hay competencia con el alimento humano y los suelos cultivables. (Leyva Guerrero, C. A. 2017).

El desarrollo de los biocombustibles de segunda generación presenta ventajas respecto a los de primera, tales como el menor nivel de impactos ambientales, un mayor rendimiento en combustible o energía por hectárea, el potencial encerrado en el aprovechamiento de una vasta gama de materia prima, la posibilidad de diseñar combustibles sintéticos a fin de optimizarlos en cuanto a su eficiencia energética y su bajo nivel de emisiones. (Hackenberg, N. 2010).

- Los **biocombustibles de tercera generación** son aquellos que provienen de microorganismos. Desde hace varias décadas las algas han sido propuestas como excelentes candidatas para tal fin. Por un lado, se tratan de organismos fotosintéticos que pueden crecer usando la luz solar y dióxido de carbono como fuente de energía y carbono respectivamente. Por otro lado, pueden crecer en aguas salobres y marinas, no aptas para consumo, así como en aguas residuales tales como los efluentes domésticos. Esto muestra la versatilidad de estos organismos y su capacidad de resistir y adaptarse a diferentes condiciones ambientales. Finalmente, sus cultivos pueden establecerse en una gran variedad de zonas, incluso zonas de bajo valor agrícola como por ejemplo zonas áridas de tierras poco fértiles. De esta manera se evita la competencia con las tierras necesarias para producir alimentos.

En relación con los biocombustibles, las microalgas han sido consideradas para la producción de biodiesel de tercera generación. Actualmente, el biodiesel está pensado para suplementar el diésel derivado del petróleo. Lo que hace interesantes a las algas es la capacidad que tienen de generar y almacenar una cantidad considerable de aceites, a tal punto que aproximadamente del 30 al 60% de su biomasa está compuesta por los mismos. A esto se le puede sumar el hecho de que hay ciertas condiciones en las que pueden aumentar el contenido de aceites a nivel celular y por ende de los cultivos.

Los cultivos de algas a gran escala han resultado muy exitosos para aplicaciones, por ejemplo, en la industria alimentaria. Pese a ello, en la actualidad no se registran emprendimientos comerciales a escala industrial para la producción de biodiesel. Esto se debe a que la tecnología aún se encuentra en un cuello de botella en términos energéticos. (Bagnato, C. 2022).

4.3. El precio del petróleo y situación actual

No podemos hacer un análisis del desarrollo de los biocombustibles sin tener en cuenta la evolución en los precios de los combustibles fósiles como el petróleo. En los últimos años hemos visto un considerable aumento del precio del petróleo debido a la unión de varios factores como la desenfrenada oferta y demanda, los actuales conflictos bélicos (en Ucrania desde el 24 de febrero de 2022) y los diferentes desastres climáticos que suceden con mayor frecuencia en todo el planeta. (Isgro, M. D. L. Á. 2006). También juega un papel importante el desarrollo y mayor industrialización de grandes potencias mundiales como son China e India, desarrollo que implica un enorme consumo de energía primaria basada en el petróleo y el gas a nivel mundial. Así pues, la competencia entre países por conseguir estas fuentes energéticas cada vez es mayor, situación que afecta al precio de los combustibles.

En la siguiente figura (Fig. 5) se muestra la evolución del precio del petróleo desde el 2004 hasta el 2022, según la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP). Durante este periodo destacan tres momentos de aumento de precio; un primer pico en el año 2008 asociado a la crisis económica global de ese mismo año, la invasión de Irak por parte de Estados Unidos y el rápido crecimiento de la demanda de China e India. Posteriormente, en el periodo 2010-2014 los precios también fueron elevados debido a las inestabilidades de la primavera árabe y la demanda por parte de las economías emergentes. Finalmente, destaca el pico del 2022 debido fundamentalmente a la guerra entre Rusia y Ucrania (Figura 6). Este conflicto bélico afecta a los precios de la gasolina y gas en Europa debido a la gran dependencia de algunos países europeos del gas ruso.

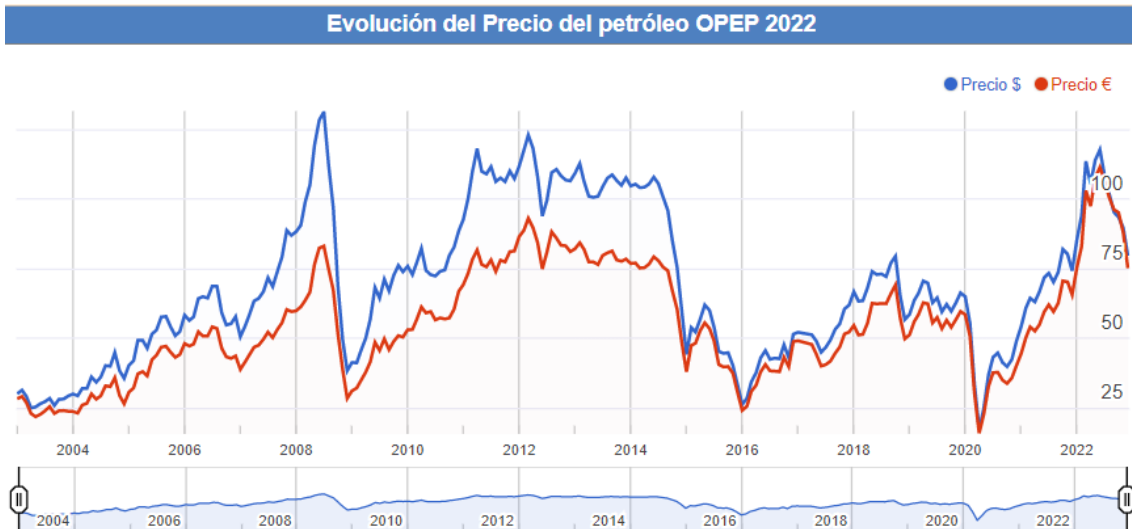


Figura 5. Precio del petróleo por barril desde 2004 hasta 2022. Fuente: OPEP. Datosmacro, 2022, (<https://datosmacro.expansion.com/materias-primas/opec>).

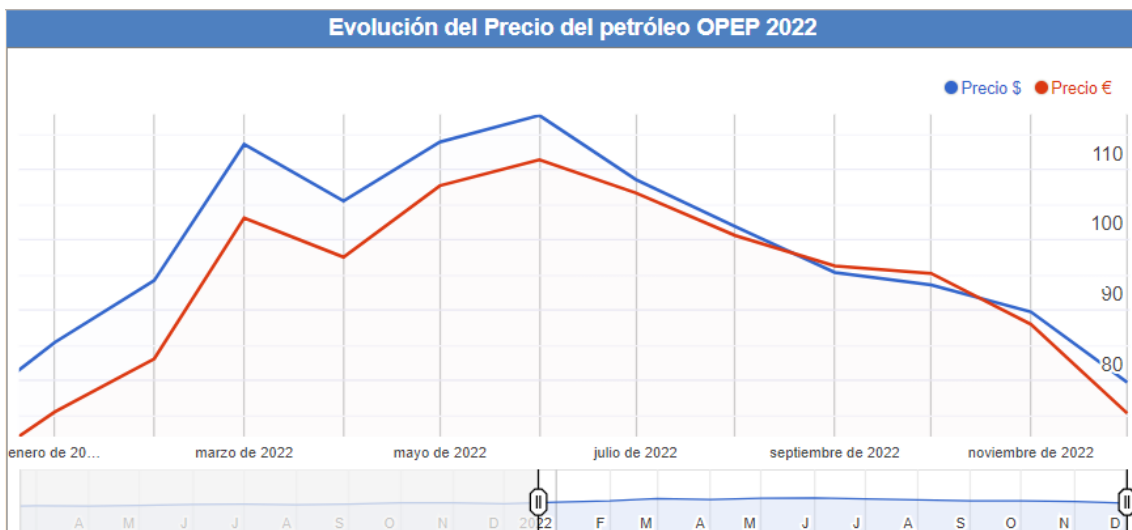


Figura 6. Precio del petróleo por barril desde el comienzo del conflicto Ucrania-Rusia. Fuente: OPEP Datosmacro, 2022, (<https://datosmacro.expansion.com/materias-primas/opec>).

En definitiva, la situación actual a nivel global se puede catalogar perfectamente como una crisis; crisis observable en los precios de las principales fuentes de energía a nivel mundial como el petróleo y el gas. Así pues, se necesita encontrar una estrategia de sustitución de los combustibles fósiles con el fin de reducir la demanda de este tipo de fuentes de energía de forma que disminuya de igual forma su oferta. Una vez obtenida esta reducción se podrá apreciar una disminución de la contaminación derivada de la extracción, transporte y uso de estos combustibles.

4.4 Plantaciones energéticas y biodiesel

El presente trabajo trata de la producción de biocombustible a partir de la palma aceitera, que se cultiva como plantación energética. Las plantaciones energéticas permiten obtener materia prima en plazos relativamente cortos, generalmente de entre 2 y 10 años. Esta modalidad de cultivo está considerada entre las más prometedoras en cuanto a su capacidad de proporcionar biomasa para energía. El tipo de plantación va a depender de diferentes factores, como las especies utilizadas, las condiciones edafoclimáticas o el destino final que se plantee dar a la biomasa producida.

Este tipo de plantaciones presentan tanto beneficios como efectos negativos. Las plantaciones actúan como sumideros de carbono, contribuyendo a la reducción de gases efecto invernadero. Resultan adecuados para la fitorremediación de suelos y control de la erosión. Además, en el caso de que sean plantaciones de especies vegetales perennes suponen una ventaja para la biodiversidad frente a cultivos anuales arables. La biodiversidad presente en estas plantaciones es sensiblemente superior a la de los cultivos que se sustituyen.

Ahora bien, no todo son ventajas; la necesidad de riego de estos cultivos en nuestras latitudes es elevada, por lo que se deberían aplicar sistemas de riego más racionales y escoger especies vegetales más eficientes en el consumo del agua. De entre las muchas especies arbóreas forestales que pueden ser utilizadas para la producción de biomasa en turnos cortos cabe destacar la falsa acacia (*Robinia pseudoacacia*), el alianto (*Ailanthus altissima*) y los fresnos (*Fraxinus spp*).

Uno de los biocombustibles que se puede obtener a partir de la palma aceitera es el biodiesel. Se trata de un combustible alternativo al diésel derivado del petróleo, que es definido por la norma ASTM D-6751 de la *American Society for Testing and Materials* como una mezcla de esteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga, obtenido a partir de lípidos renovables como aceites y grasas de origen vegetal o animal y utilizado en motores de encendido por compresión en cualquier proporción con diésel procedente de combustibles fósiles. Se trata de un combustible oxigenado con una combustión más completa que la del diésel, con mejores propiedades de lubricidad y largos tiempos de vida de los componentes del motor. Por su parte, el biodiesel puede ser utilizado directamente en su forma pura (B100), o en mezclas con diésel a diferentes proporciones bajo ciertos criterios de calidad regulados por las instituciones competentes.

El biodiesel es una tecnología clave para minimizar las emisiones de gases y la dependencia de las fuentes energéticas poco amigables con el medioambiente. (Quiros Celis, M. C. 2022). Así pues, muestra ser estrategia clave para reducir sustancialmente la emisión de la mayoría de los gases y partículas contaminantes de la atmosfera.

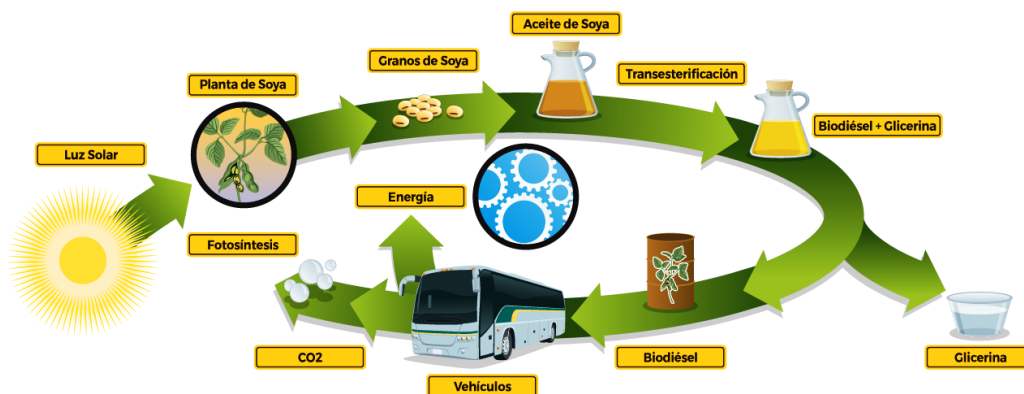


Figura 7. Ciclo de producción del biodiesel. Fuente; Quintana Roo, 2018, (<https://www.ip.gov.py/ip/empresarios-del-biodiesel-esperan-que-la-mezcla-se-incremente-hasta-el-10/>)

El uso del biodiesel derivado de la palma genera menos emisiones de GEI en comparación con las emitidas por parte de las que provienen de los combustibles fósiles. Se estima que por Km, un vehículo emite entre 14 y 94 g de CO₂ equivalentes en comparación con el diésel fósil (190 g de CO₂ eq. por km). Si se emplea B100 es posible reducir cerca del 50-108% de las emisiones de GEI.

Hay que tener en cuenta que el procesamiento de transformación de la materia prima como el aceite de palma en biodiesel también genera emisiones de GEI. Estas emisiones son causadas principalmente por el vertimiento de aguas residuales procedentes de las fábricas de aceite. Se tratan de aguas residuales con valores altos en Demanda Química de Oxígeno (DQO) y metano. (Fontalvo Gómez, M., Vecino Pérez, R., y Barrios Sarmiento, A. 2014).

4.5 La palma aceitera (*Elaeis guineensis*)

La palma aceitera (*Elaeis guineensis*) es una planta tropical de climas cálidos que puede ser cultivada de forma comercial, en estados semisilvestre o incluso en forma completamente silvestre (Cruz Alvarado, J. N. 2022). Su área de distribución natural son las costas del Golfo de Guinea, en África occidental. Se introdujo a América del Sur en la época de la colonización a finales del siglo XV por parte de los portugueses y españoles. El nombre científico de esta planta proviene de las palabras “elaoin” que significa “aceite” y de la palabra “guineensis” que hace referencia a la zona de donde proviene, Guinea. (Borreo, C. 2022)

Existen diversas variedades de *Elaeis guineensis* siendo las más destacadas la variedad **Dura**, que tiene un endocarpio grueso y mesocarpio delgado, la variedad **Pisifera**, que no presenta endocarpio aparente y tiene abundante mesocarpio, y una variedad híbrida llamada **Tenera**, cuyo endocarpio es delgado y tiene un mesocarpio grueso. Cabe destacar que los racimos y frutos de este híbrido son los utilizados comercialmente para la extracción de aceite.

La palma aceitera requiere de una serie de condiciones edafoclimáticas para su desarrollo. Prefiere regiones tropicales con temperaturas entre los 23 y los 27 °C, una precipitación sobre los 1.800-2.000 mm anuales y un mínimo de 5 horas de luz al día. Respecto a los suelos, crece en suelos de elevada fertilidad, de textura limosa y un pH entre los 4,5 y 7,5.

En cuanto al comportamiento fenológico, esta especie responde esencialmente a las condiciones edafoclimáticas, de aquí que, las manifestaciones morfológicas estén reguladas por la disponibilidad de agua, la calidad fisicoquímica del suelo y la microbiología de este. La etapa reproductiva comienza a los 2 años y culmina a los 3 con la formación y maduración de los frutos, con ciclos reproductivos que pueden extenderse hasta los 30 años (González, F. 2012).

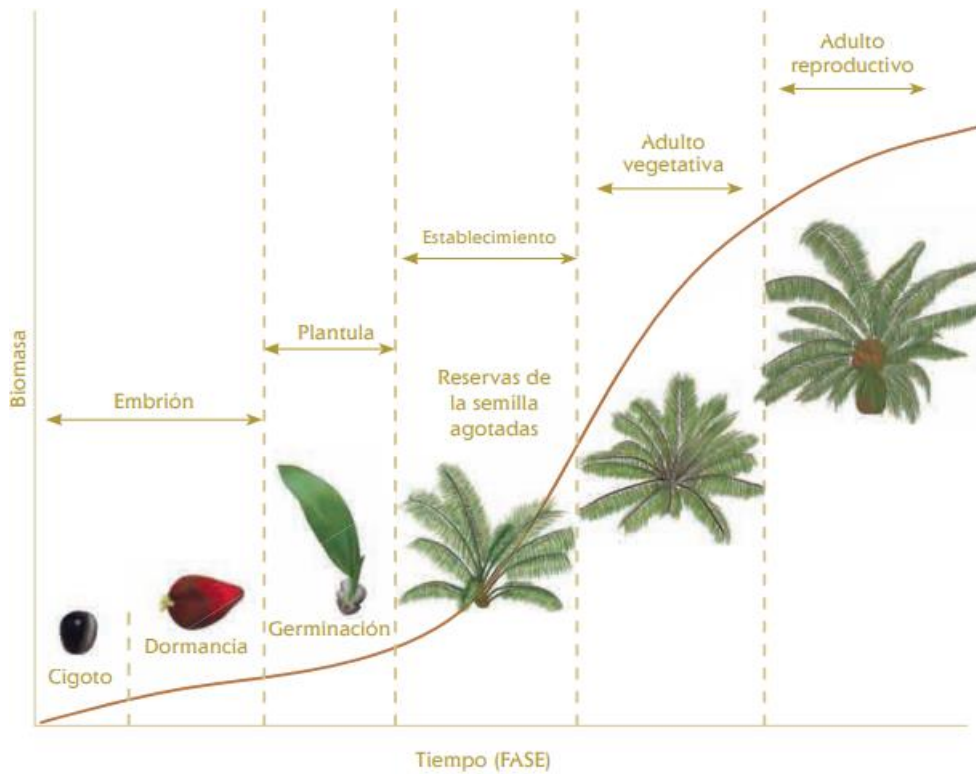


Figura 8. Fases de desarrollo de la palma de aceite. Fuente; adaptación de Tomlinson (1990). DC Forero et al. 2012.

En lo que se refiere a la morfología de la palma de aceite, se va a dividir en las distintas partes que conforman la planta.

- La **semilla** es una nuez que se localiza en la parte central del fruto. Constan de un endocarpio de consistencia dura y de 1 a 3 almendras.

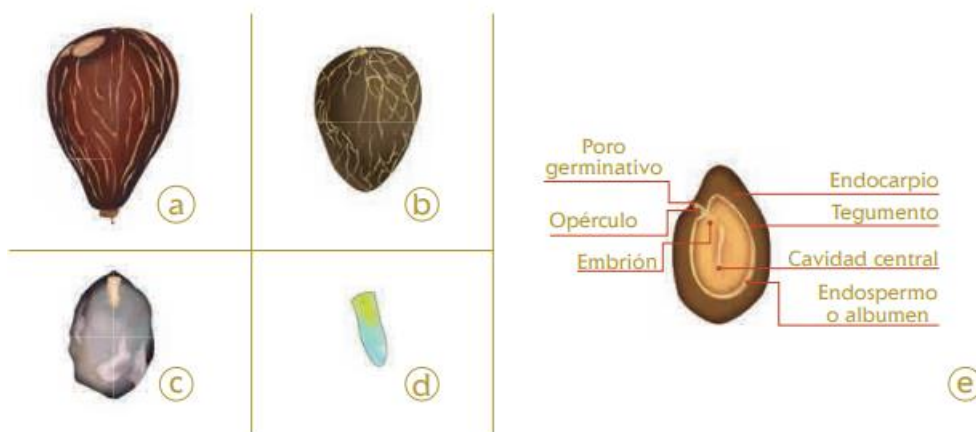


Figura 9. Semilla de palma de aceite a) semilla seca, b) almendra, c) endospermo y embrión d) embrión aislado y e) esquema de la parte interna de la semilla. Fuente; DC Forero et al. 2012.

- Las **hojas** van cambiando de forma después de la germinación; las primeras que se forman son lanceoladas, es decir, angostas y elípticas y terminan en punta hacia ambos extremos. Después, se dividen solo a lo largo de la línea de raquis, cerca del ápice y se llaman bífidas. Por último, la hoja comienza a rasgarse en dos lugares: a lo largo de los pliegues y alrededor de los bordes exteriores.

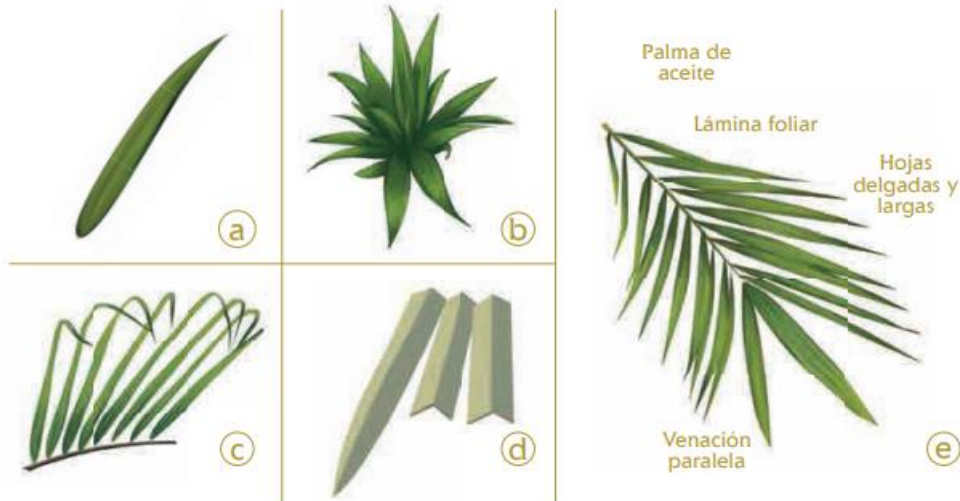


Figura 10. Forma de las hojas en palma de aceite a) hoja lanceolada, b) hoja bífida, c) rasgado de la hoja, d) folíolos reduplicados, e) hoja madura. Fuente; DC Forero et al. 2012.

- El **tallo** es único y de tipo pleonántico, es decir, las inflorescencias aparecen en las axilas de las hojas y se producen a medida que la planta continúa con su crecimiento vegetativo. El tallo es erecto, solitario y columnar. En él aparecen las bases peciolares de las hojas hasta la etapa adulta que, al caer, dejan al descubierto cicatrices amplias y se aprecian los entrenudos.
- Las raíces siguen un sistema fascicular, es decir, la plántula emite una radícula que es reemplazada pronto por las raíces fasciculadas, que salen del punto de unión entre la radícula y el hipocótilo.
- Las **flores e inflorescencia**. La palma aceitera presenta 2 tipos de floración: 1) hapaxántica, con una transición abrupta al estado reproductivo, donde las ramas reproductivas se expanden y florecen después de que ha cesado el crecimiento vegetativo y la palma muere; 2) pleonántica, donde a partir de un tallo solitario

se producen las ramas florales en las axilas de las hojas vegetativas y continúan produciéndose a medida que la palma sigue su crecimiento vegetativo.



Figura 11. Inflorescencias femeninas de *Elaeis guineensis*. Fuente: DC Forero et al. 2012.

- El **fruto** de la palma de aceite es una drupa sésil cuya forma puede ser esférica, ovoide o alargada y algo abultada en el ápice. Su longitud varía entre 2 y 5 cm. El **mesocarpio es excepcionalmente rico en aceite (80% de masa seca), haciendo de esta especie la de mayor rendimiento de aceite en el mundo.** El endospermo está compuesto por el tegumento, albumen y el embrión. Del endospermo se extrae otro tipo de aceite; el aceite de palmiste. El embrión es lineal de 4 a 5 milímetros de longitud, alojado en una pequeña cavidad del albumen. (Forero, DC et al. 2012)



Figura 12. Partes del fruto. a) Apariencia externa de un fruto en desarrollo y b) corte transversal del fruto con sus partes. Fuente; DC Forero et al. 2012.

4.6 Características energéticas del aceite de palma

Las propiedades de mayor importancia en el momento de llevar a cabo un estudio sobre una sustancia y su transformación son las propiedades energéticas de la misma, ya que en base a ellas es posible llevar a cabo la determinación de la viabilidad de una reacción química y la cantidad total de calor que debe añadirse o retirarse de la sustancia para llegar a un determinado estado de la materia. Por lo tanto, estas propiedades determinan el diseño del proceso, así como los costes asociados a él.

El calor de fusión del aceite de palma es de entre 84,8 y 93,4 J/g, es decir, se requieren unos 90 J de energía por gramo de aceite para pasarlo de sólido a líquido. El valor varía dentro del rango anterior en función de la cantidad de ácidos grasos saturados del aceite. A mayor proporción de ácidos grasos saturados (como el ácido palmítico y esteárico), mayor será el calor requerido para fundirlo.

Por otro lado, la capacidad calorífica mide la cantidad de energía necesaria para generar un cambio de temperatura por una unidad de masa. Según la determinación de Clark et al. (1946) en el rango de $25 < T < 100$ °C para aceites sin hidrogenar, la capacidad calorífica es de 2,07-2,29 J/g °C y tiene un comportamiento inversamente proporcional al índice de yodo del aceite. Según Rincón y Martínez el valor para el aceite de palma es de 1,76-2,15 J/g °C. (Rincón M., S. M., y Martínez C., D. M. 2009).

4.7 Procesos y tecnologías para la extracción de aceite de palma y obtención del biodiesel

La extracción mecánica es la más habitual. En ella se utilizan prensas, de modo que los rendimientos de extracción dependen de la presión aplicada, el tiempo y la temperatura a la que se somete el fruto de la palma. La clave para obtener un aceite de palma de alta calidad radica en los tipos de prácticas agrarias, especialmente en la forma en la que se recolecta y se procesa el fruto de la palma.

El proceso de la obtención del aceite consta de las siguientes etapas (Quiros Celis, M. C. 2022)., tal y como se observa en la figura 13:

1. Esterilización del fruto de la palma. Consiste en someter al fruto a un tratamiento térmico a base de vapor de agua durante unos 90 minutos. La finalidad de este tratamiento es desactivar la enzima lipasa de la capa del mesocarpio e impedir la formación de ácidos grasos libres (AGL).
2. Desfrutamiento. Se separan los frutos del racimo mediante un procedimiento mecanizado con un tambor rotativo. El fruto continua el camino de extracción, mientras que el raquis se desecha para obtener compost y abono orgánico.
3. Digestión. Se separa el mesocarpio del fruto y se rompen las células oleaginosas para facilitar la extracción de aceite.
4. Prensado. Operación unitaria en la que se obtiene el aceite mediante un proceso de extracción mecánica que se efectúa a través de fuertes presiones ejercidas por prensas.
5. Clarificación. Conjunto de operaciones unitarias que separan y purifican el aceite de la mezcla líquida extraída en las prensas. Puede realizarse por separación estática (con agitación) o por separación dinámica (por diferencia de densidades).

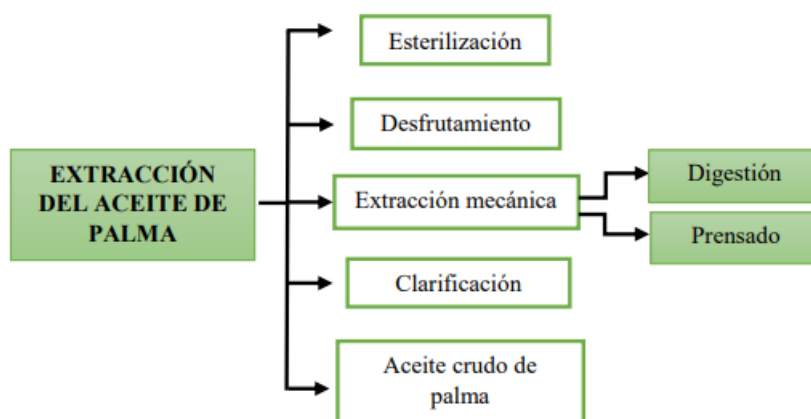


Figura 13. Etapas del proceso de extracción del aceite crudo de palma. Fuente; Quiros Celis, M. C. 2022. Estudio analítico de las rutas de conversión para la producción de biodiésel a partir de aceite extraído de palma africana.

Una vez obtenido el aceite se realiza una **transesterificación** para obtener el biodiesel. La transesterificación es la tecnología más utilizada ya que a través de ella se generan combustibles más limpios y ambientalmente seguros. Es un proceso de cambio de triglicéridos con alcoholes en ésteres de alquilo y glicerol en presencia de catalizadores.

Para obtener el máximo rendimiento es vital ajustar los parámetros con los que tienen lugar la reacción de transesterificación. Estos parámetros son:

- **Los ácidos grasos libres.** Es importante que las materias primas sean de alta calidad, es decir, aceites con una baja concentración de ácidos grasos libres, sin gomas ni impurezas.
- **La humedad y el contenido de agua.** La humedad debe ser baja ya que se puede producir un fenómeno de saponificación o de neutralización.
- **Tipo y concentración de los catalizadores.** La función de los catalizadores en este proceso es modificar la cinética mejorando las velocidades de reacción y la selectividad hacia los productos deseados. A escala industrial se suele utilizar la catálisis básica homogénea, que actúa más rápido y permite operar en condiciones moderadas. En este tipo de catálisis se utilizan bases fuertes como el hidróxido de sodio (NaOH) y el hidróxido de potasio (KOH), ya que presentan altas tasas de conversión a condiciones de operación moderada

Tabla 1. Tipos de catalizadores empleados en la producción de biodiesel. Fuente: Quiros Celis, M. C. 2022. Estudio analítico de las rutas de conversión para la producción de biodiésel a partir de aceite extraído de palma africana.

Tipos de catalizadores	Ejemplo de catalizadores
Ácidos homogéneos	H ₂ SO ₄ , HCL, H ₃ PO ₄
Ácidos heterogéneos	Zeolitas, resinas sulfónicas, SO ₄ /ZrO ₂ TiO ₂ y catalizadores a base de carbono
Básicos homogéneos	KOH, NaOH
Básicos heterogéneos	MgO, CaO
Enzimáticos	Lipasas

- La temperatura y el tiempo de reacción. La temperatura óptima para la reacción de transesterificación del aceite de palma es de 50°C.

- La tasa y modo de agitación. La agitación aumenta la velocidad de la reacción de transesterificación.

Las operaciones del proceso de transesterificación incluyen los siguientes procesos:

- Mezclador: Se utiliza para simular la mezcla de KOH con el metanol. Es necesario este paso ya que el KOH debe disolverse para formar el complejo que reaccionará con el aceite.
- Sistema de bombeo: Se requiere transportar los fluidos desde el límite de batería hasta los diferentes equipos tanto de reacción como de acondicionamiento, suministrando la energía necesaria para vencer la fricción.
- Reactor: Dentro de los modelos disponibles se requiere un reactor continuo para poder simular la operación a gran escala. Para comparar la información de laboratorio con la simulada es posible utilizar el modelo de un reactor por lotes.
- Tanque separador de fases: Permite separar el biodiésel de los productos más densos como el glicerol y los productos intermedios.
- Tanque para lavar: Se requiere en algunos casos del empleo de un tanque que permita lavar el biodiésel para quitarle las impurezas de potasio y alcoholes.
- Columna de destilación: Se utiliza para separar el metanol residual en el biodiésel, así como el aceite residual en productos.

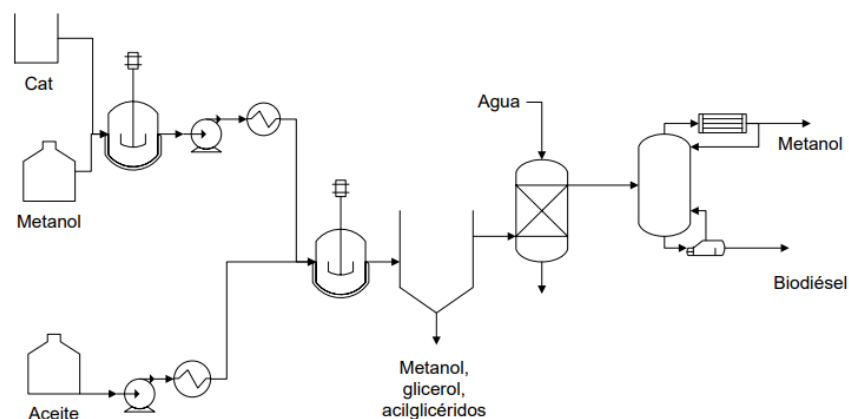


Figura 14. Diagrama de flujo simplificado del proceso de transesterificación de aceite vegetal. Fuente; Polo Llanos, L.M., 2020. Simulación de una planta de obtención de biodiésel mediante transesterificación catalítica homogénea de trioleína de aceite de palma.

Por otro lado, cabe destacar la tecnología de **microemulsificación** ya que se está convirtiendo en un campo de investigación de primer nivel. Este método implica la simple mezcla de aceite vegetal con un disolvente polar (agua o etanol) en presencia de agentes tensioactivos. Estos agentes son sustancias que influyen por medio de la tensión superficial en la superficie de contacto entre las dos fases.

La microemulsificación ofrece ventajas significativas desde la perspectiva de la economía de procesos y la conservación de energía. Las principales ventajas son; un ciclo de producción corto y una implementación sencilla sin necesidad de calor y sin formación de subproductos al no haber reacciones químicas.

Por último, sea cual sea el método de obtención del biodiesel se deben cumplir una serie de estándares de calidad. Estos estándares se evalúan a través de ciertos parámetros fisicoquímicos que han sido establecidos con el fin de medir sus propiedades y así determinar si se trata de un combustible apto para la comercialización e introducción al mercado para su uso en motores diésel. (Quiros Celis, M. C. 2021).

5. Metodología

En el presente trabajo de fin de grado se han utilizado diferentes herramientas digitales y programas, concretamente; Google Earth Engine (GEE), Google Earth, Python y QGIS. A continuación se explica el uso que se ha hecho de cada una de ellas.

5.1 Google Earth Engine como herramienta de desarrollo

Se ha utilizado **Google Earth Engine (GEE)** para el estudio de la distribución de las plantaciones de palma aceitera (*Elaeis guineensis*). Se trata de una tecnología enmarcada dentro de los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Los SIG tienen una gran variedad de aplicaciones entre las que destacan llevar a cabo investigaciones científicas de diversos ámbitos, gestionar los recursos naturales, realizar descubrimientos arqueológicos o ayudar a evaluar impactos ambientales.

Más concretamente Google Earth Engine es una herramienta que permite combinar un catálogo de varios petabytes de imágenes satelitales y conjuntos de datos geoespaciales con capacidades de análisis a escala planetaria. Científicos,

investigadores y desarrolladores usan Earth Engine para detectar cambios, mapear tendencias y cuantificar diferencias en la superficie de la Tierra.

En la página web de Google Earth Engine encontramos un catálogo extenso de multitud de variables que pueden ser utilizadas para el desarrollo de proyectos científicos, hacer un seguimiento de los climas, la temperatura superficial terrestre y obtener imágenes de diversos satélites. Las ventajas que presenta trabajar en la nube de GEE son las siguientes:

- Cargar y usar datos propios en formato ráster y vectorial.
- Descargar información masiva o individualizada por bandas.
- Procesar datos mediante la programación de scripts.
- Visualizar datos satelitales históricos.
- Trabajar con imágenes satélites, Modelos Digitales de Elevación (MDE) y Modelos Digitales del Terreno.
- Es gratuito para investigación, educación y otros usos sin ánimo de lucro.
- No se necesita descargar ningún archivo pesado en el ordenador de todas las capas e información relacionada con la zona, ya que mediante la programación el sistema escoge todas las imágenes e información que necesita para realizar el estudio desde la nube de Google Earth.
- Se puede modificar el código y, en un instante, podemos cambiar la información que queremos obtener e incluso las nuevas imágenes que se generan. De esta manera podemos llevar a cabo diferentes estudios con distintas variables al mismo tiempo.

Tal y como se ha mencionado anteriormente, los datos utilizados en este estudio se han obtenido de la página web oficial de Google Earth Engine®, concretamente del apartado llamado "Datasets", donde se puede encontrar toda clase de archivos con datos pertenecientes a una multitud de temas relacionados con el medioambiente, población, usos del suelo, administración, entre otros. En el caso del presente estudio se han utilizado las siguientes variables que ayudan a explicar la distribución de las plantaciones de palma aceitera:

- Variables topográficas:
 - Altitud (alt): representa la altitud del punto a nivel del mar (0m)
 - Pendiente (pen): representa el porcentaje de inclinación del suelo respecto al eje x.
 - Orientaciones (ori): representa la orientación del sol respecto al punto estudiado.

- Variables del suelo:
 - Materia orgánica (org): representa la cantidad de materia orgánica en %.
 - Ph (ph): representa el carácter ácido-básico del suelo [1-14].
- Datos Terraclimate. Los datos obtenidos tienen una precisión de 2,5 minutos.
 - Temperatura máxima (tmx): representa la temperatura máxima captada en un punto.
 - Temperatura mínima (tmn): representa la temperatura mínima captada en un punto.
 - Humedad del suelo (sol): representa el % de humedad en el suelo del punto escogido.
 - Precipitación (pre): Representa la cantidad de lluvia caída sobre un punto (mm).

Para llevar a cabo el estudio se han seleccionado 1000 puntos mediante Google Earth Engine; 500 puntos repartidos por el territorio de Colombia y 500 puntos repartidos por el territorio de Nigeria. Estos puntos han sido seleccionados después de una clasificación visual realizada mediante Google Earth en la que se han delimitado polígonos donde se reconoció la existencia de plantaciones de *Elaeis guineensis*. En la siguiente figura (Figura 15) se muestra un ejemplo de polígono con plantación de palma aceitera, por otro lado en la figura 16 se muestra los puntos de referencia de plantaciones en el territorio colombiano.



Figura 15. Polígono de plantación de palma aceitera obtenido mediante Google Earth. Fuente: elaboración propia.

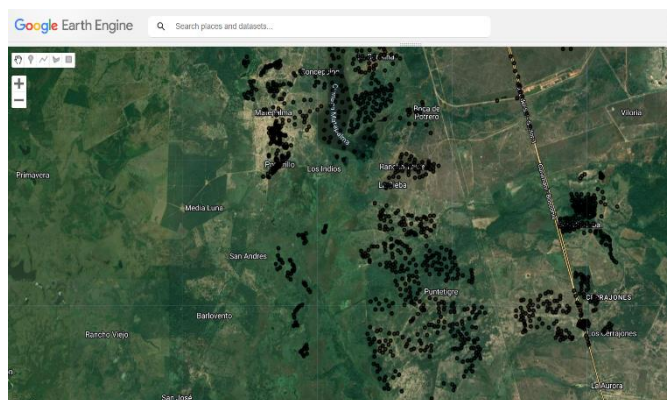


Figura 16. Puntos de referencia de las plantaciones de palma aceitera en territorio colombiano. Fuente: elaboración propia.

Se han marcado puntos tanto sobre plantaciones de palma como sobre otros elementos de la superficie (agua) para así “enseñar” a GEE a diferenciar entre lo que es una palmera y lo que no. De este modo el programa podrá extraer la información de estas plantaciones y extrapolarla al resto del mundo.

A continuación se muestran los puntos de Colombia (Figura 17) y Nigeria (Figura 18) que se han escogido y que se sitúan sobre plantaciones de palma aceitera.

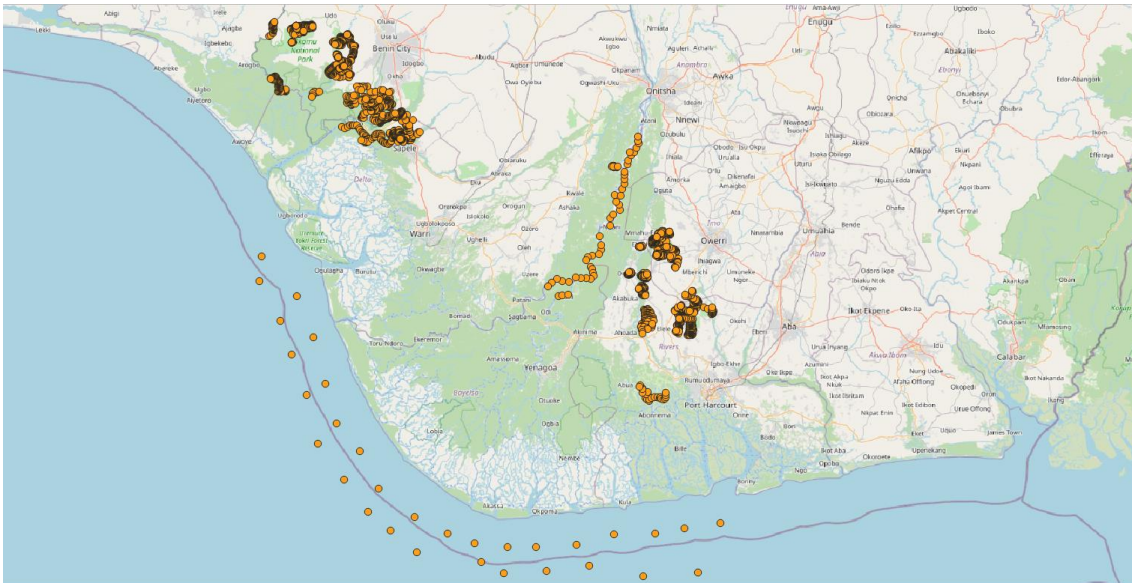


Figura 17. Puntos seleccionados sobre plantaciones de palma en Nigeria, concretamente a lo largo del delta del río Níger, una zona históricamente conocida por su gran importancia en la producción de aceite de palma. En la imagen también se aprecian los puntos sobre el agua que se han utilizado para enseñar a GEE lo que no son plantaciones. Fuente: elaboración propia.

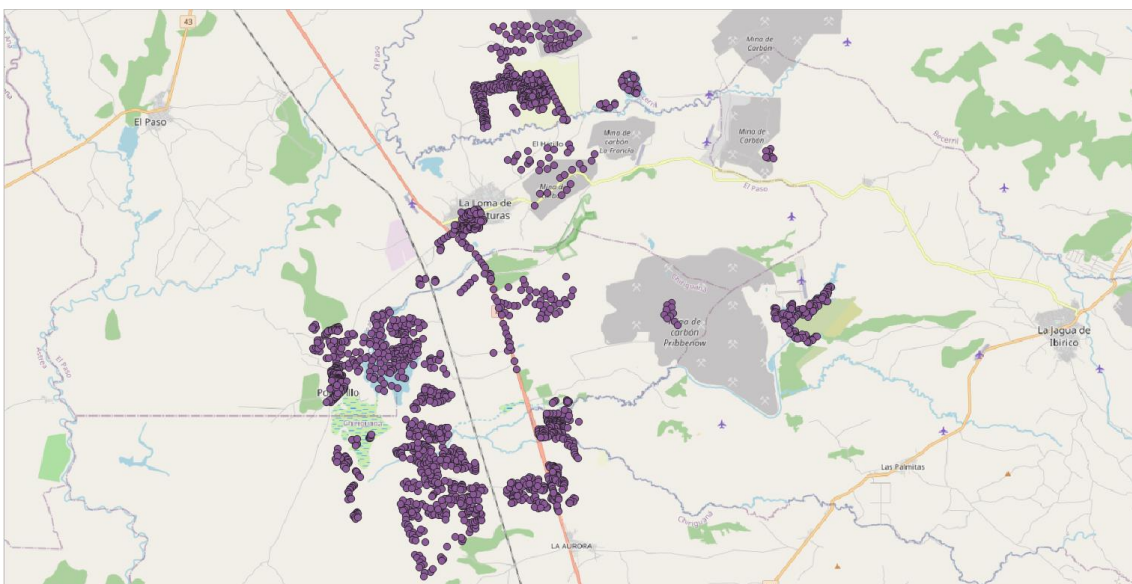


Figura 18. Puntos seleccionados sobre plantaciones de palma aceitera en Colombia, en el departamento de Cesar, una zona plana de baja altitud idónea para el cultivo de esta especie. Fuente: elaboración propia.

5.2 Python

Se trata de un lenguaje de programación ampliamente utilizado. En el caso del presente estudio se ha aplicado en la ejecución de órdenes que nos ayuden a obtener resultados sobre las variables climáticas, edáficas y topográficas existentes en las plantaciones de palma aceitera de Colombia y Nigeria. Debido a la gran cantidad de información y, para poder analizar los resultados más fácilmente, se ha calculado la media y la variación estándar de cada una de las variables expuestas anteriormente.

En la siguiente imagen se muestra parte del código utilizado para obtener la media y la variación estándar de las variables. En el apartado resultados se analizan dichos valores estadísticos.

```
df_palmeras = dataframe.loc[(dataframe['TC']== 1)]
varianza = np.var(df_palmeras)
desviacion = np.std(df_palmeras)
media = np.mean(df_palmeras)

for i,j in zip(media,desviacion):
    coeficiente = (j*100)/i
    print (coeficiente)

print(desviacion)
print(media)
```

Figura 19. Código de obtención de la media y de la desviación estándar de cada variable. Fuente: elaboración propia.

Otros datos obtenidos con Python proceden de la matriz de aptitud, que muestra las medias, las mínimas y las máximas de cada una de las variables utilizadas. En el apartado resultados se muestra dicha matriz y se comparan los valores de las 2 zonas escogidas para realizar el trabajo (Colombia y Nigeria).

Finalmente, también se ha utilizado Python para extrapolar los datos de las plantaciones de palma aceitera de Colombia y Nigeria a la Península Ibérica. Ello con el propósito de conocer cuáles son las zonas de la Península más adecuadas para llevar a cabo plantaciones de dicha especie vegetal.

Por último, se han escogido las variables que explican en mayor grado la distribución de las plantaciones de palma aceitera y se han reclasificado teniendo en cuenta los valores de la matriz de aptitud. En la reclasificación se han agrupado los valores en dos grupos;

- **Grupo 0 (color blanco):** grupo de valores que están fuera del intervalo de aptitud. A las zonas de la Península que pertenecen a este grupo, es decir, que no cumplen con los requisitos de las plantaciones, se les ha dado el valor de 0 (No válido). Dichas zonas quedan marcadas en el mapa mediante el color blanco.

- **Grupo 1 (color negro):** grupo de valores que está dentro del intervalo de aptitud. A las zonas de la Península que pertenecen a este grupo, es decir, que cumplen con los requisitos de las plantaciones, se les ha dado el valor de 1 (Válido). Dichas zonas aparecen marcadas en el mapa mediante el color negro.

A continuación se muestra una tabla que recoge los valores que definen el intervalo de aptitud. Se trata de los valores mínimos y máximos que cumplen las plantaciones de palma aceitera para cada una de las variables climáticas, edáficas y topográficas escogidas. En la tabla no se muestran todas las variables que se han tenido en cuenta para realizar el estudio, pero sí las más importantes a la hora de elegir las zonas idóneas. Cabe destacar que se ha excluido del estudio la variable “orientación” ya que las plantaciones se desarrollan en zonas de nula o muy baja pendiente y por lo tanto no existe orientación.

Tabla 2. Intervalos de aceptación de las zonas idóneas.

VARIABLE	MÍNIMO	MÁXIMO	Unidades
Precipitación (pre)	176	264	mm
Temperatura máxima (tmx)	26	40	°C
Temperatura mínima (tmn)	19	27	°C
Altitud (srtm)	33	50	msnm
Pendiente (pen)	0	2	%
Ph (ph)	46	69	-
Materia orgánica (org)	4,19	6,29	%
Humedad del suelo (sol)	136	205	%

Cabe decir que esta reclasificación ha sido llevada a cabo mediante dos métodos distintos (Python y QGis), pero el estudio se centra en el uso de Python principalmente, ya que la finalidad del uso de QGis ha sido la de comprobar que los resultados obtenidos con el código son correctos.

A continuación se muestra el código de Python que se ha utilizado para la reclasificación.

```
rec_pre = precipitacion_r.gte(264) and precipitacion_r.lte(176)
Mapa.addLayer(rec_pre, {}, 'Rec Pre')

rec_tmh = maxTem_r.gte(40) and maxTem_r.lte(26)
Mapa.addLayer(rec_tmh, {}, 'Rec Tmh')

rec_tmh = minTem_r.gte(27) and minTem_r.lte(19)
Mapa.addLayer(rec_tmh, {}, 'Rec Tmh')

rec_srtm = srtm_r.gte(50) and srtm_r.lte(33)
Mapa.addLayer(rec_srtm, {}, 'Rec alt')

rec_pen = pendiente_r.gte(2) and pendiente_r.lte(0)
Mapa.addLayer(rec_pen, {}, 'Rec pen')

rec_ph = ph_r.gte(69.3) and ph_r.lte(46.2)
Mapa.addLayer(rec_ph, {}, 'RecPh')

rec_organica = organica_r.gte(6.29) and organica_r.lte(4.19)
Mapa.addLayer(rec_organica, {}, 'RecOrg')

rec_humedadSuelo = humedadSuelo_r.gte(205) and humedadSuelo_r.lte(136)
Mapa.addLayer(rec_humedadSuelo, {}, 'RecSol')

Mapa
```

Figura 20. Código de reclasificación de las variables de estudio escogidas para la elección de las zonas idóneas en la Península Ibérica. Fuente: elaboración propia.

6. Resultados

6.1 Análisis e interpretación de valores climáticos, edáficos y topográficos que requieren las plantaciones de palma aceitera

En las siguientes tablas se pueden observar los valores de desviación típica y media aritmética de las diferentes variables tanto para las plantaciones de Colombia (Tabla 3 y 4) como para las de Nigeria (Tabla 5 y 6). Hay que tener en cuenta que los valores corresponden al periodo temporal trimestral que va del 21-3-2022 al 21-6-2022. Tras las tablas se analizan los valores y se comparan entre sí.

Cabe recordar que la desviación estándar es una medida de extensión o variabilidad en la estadística descriptiva. Se utiliza para calcular la variación o dispersión en la que los puntos de datos individuales difieren de la media, por ello se deduce que a menor desviación, más cercanos están los datos entre ellos y mejor medición se ha obtenido.

Tabla 3. Valores de desviación típica Colombia.

PLANTACIONES DE COLOMBIA		
TC (Desviación)	0.0	Unidades
Precipitación	6,38	mm
M. Orgánica	1,05	%
Orientación	116,89	
Altitud	7,02	msnm
Humedad del suelo	16,13	%
Evapotranspiración	1,35	mm/s
Temperatura mínima	0,024	°C
Temperatura máxima	0,076	°C
Ph	2,24	
Pendiente	0,53	%

TC	0.000000
pre	6.380708
org	1.058224
ori	116.890950
alt	7.023608
den	9.676376
sol	16.130699
aet	1.350929
tmn	0.024917
pen	0.532700
ph2	2.240106
tmx	0.076559

Tabla 4. Valores de media aritmética Colombia

PLANTACIONES DE COLOMBIA		
TC (Media)	1.0	Unidades
Precipitación	220,31	mm
M. Orgánica	5,24	%
Orientación	127,43	
Altitud	41,32	msnm
Humedad del suelo	171,01	%
Evapotranspiración	133,1	mm/s
Temperatura mínima	23,71	°C
Temperatura máxima	33,53	°C
Temperatura media		°C
Ph	5,76	
Pendiente	0,43	%

TC	1.000000
pre	220.319920
org	5.247485
ori	127.435924
alt	41.327968
den	133.454728
sol	171.011938
aet	133.104024
tmn	23.719048
pen	0.439735
ph2	57.762575
tmx	33.536419

Tabla 5. Valores de desviación típica Nigeria

PLANTACIONES DE NIGERIA		
TC (Desviación)	0.0	Unidades
Precipitación	23.21	mm
M. Orgánica	1.67	%
Orientación	109.61	
Altitud	21.20	msnm
Humedad del suelo	22.88	%
Evapotranspiración	2.25	mm/s
Temperatura mínima	0.17	°C
Temperatura máxima	0,15	°C
Ph	2.33	
Pendiente	0,76	%

TC	0.000000
pre	23.216600
org	1.679438
ori	109.611328
alt	21.207972
den	14.914551
sol	22.881374
aet	2.256084
tmn	0.155135
pen	0.767860
ph2	2.335649
tmx	0.177328

Tabla 6. Valores de media aritmética Nigeria

PLANTACIONES DE NIGERIA		
TC (Media)	1.0	Unidades
Precipitación	208.58	mm
M. Orgánica	6.06	%
Orientación	158.36	
Altitud	52.13	msnm
Humedad del suelo	165.33	%
Evapotranspiración	112.43	mm/s
Temperatura mínima	22.87	°C
Temperatura máxima	31.52	°C
Ph	5,10	
Pendiente	0.73	%

TC	1.000000
pre	208.580476
org	6.061429
ori	158.364596
alt	52.132857
den	123.978571
sol	165.366714
aet	112.431238
tmn	22.874524
pen	0.731560
ph2	51.021429
tmx	31.524476

A continuación se hace una interpretación de los datos obtenidos mediante Python.

- **Altitud.** La altitud media de las plantaciones colombianas estudiadas ha sido de 41,32 m y la de las nigerianas de 52,13 m. Las plantaciones colombianas se sitúan en el noroeste del país, una zona de tierras planas de baja altitud, y en Nigeria las plantaciones se localizan en el inmenso delta del río Níger, conocido como la zona de “los ríos de aceite” ya que históricamente ha sido una importante área productora de aceite de palma.

- **Pendiente.** Tanto en Colombia como en Nigeria, la pendiente media de las plantaciones es casi nula y en ningún caso supera el 1%. Hay que tener en cuenta que las plantaciones se desarrollan en zonas sin pendiente para facilitar el cultivo extensivo de la palma.
- **Precipitación y temperatura.** Por un lado, en Colombia la precipitación media del periodo estudiado ha sido de 220,3 l/m² (= 220,3mm) y en Nigeria ha sido de 208,58 mm. Las plantaciones se encuentran en latitudes similares que, atendiendo a la clasificación climática de Köppen, presentan un clima tropical con lluvias abundantes y temperaturas elevadas y constantes a lo largo de todo el año. A continuación se muestran los climogramas de Valledupar (Colombia, Figura 21) y Omokuro (Nigeria, Figura 22), localidades situadas en las proximidades de las plantaciones.

Cabe destacar que la desviación de la variable precipitación se debe principalmente a las diferencias de precipitación que existen en las áreas seleccionadas y es que pueden existir variaciones orográficas o vientos locales que condicionan los patrones de lluvias a nivel regional o local.

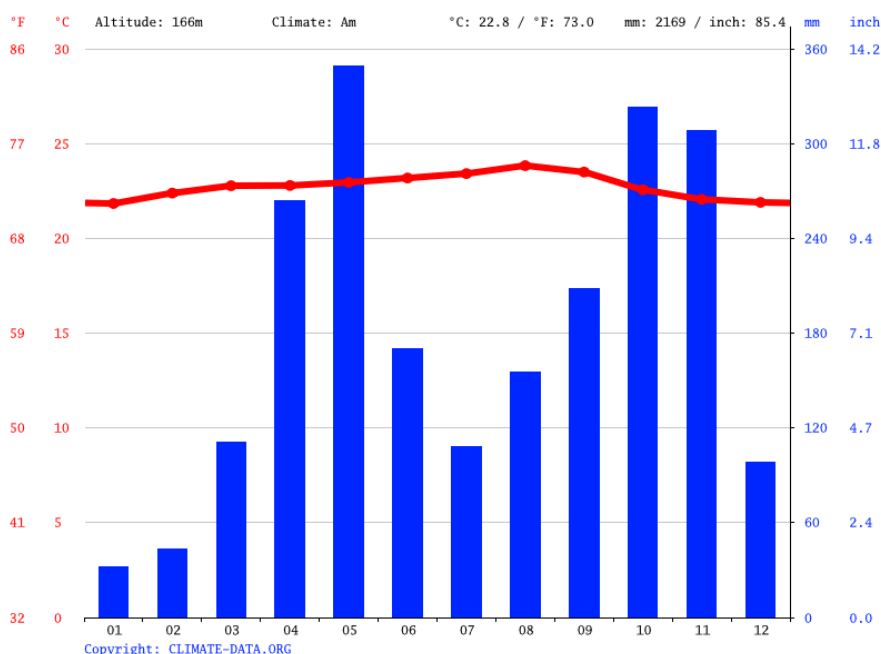


Figura 21. Climograma de zona próxima a las plantaciones colombianas. Muestra un clima tropical. Fuente; Climate Data. <https://es.climate-data.org/>

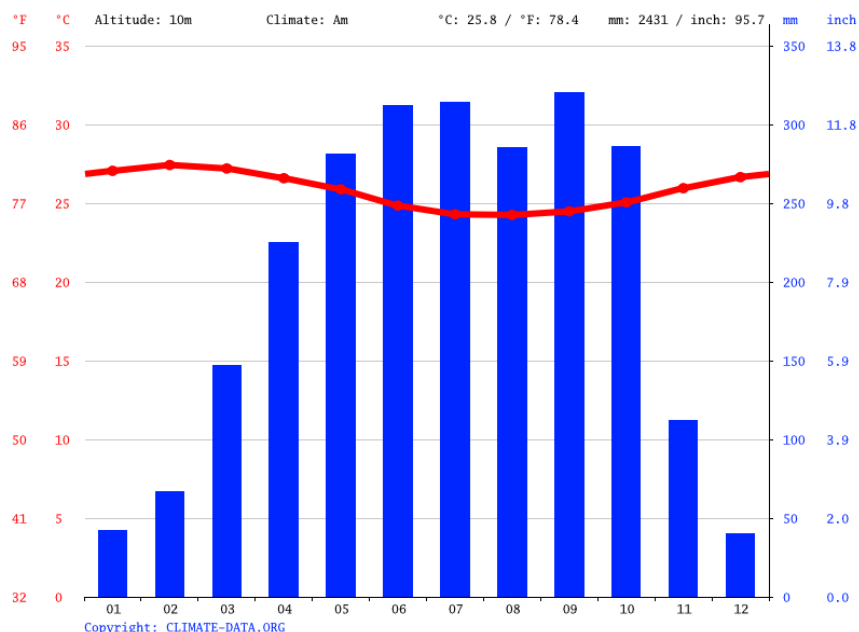


Figura 22. Climograma de zona próxima a las plantaciones nigerianas. Muestra un clima tropical. Fuente; Climate Data. <https://es.climate-data.org/>

- **Materia orgánica.** Los % de materia orgánica de los suelos de las plantaciones son similares para Colombia (5,24%) y Nigeria (6,06%). Son valores relativamente bajos debido al tipo de suelo existente en zonas tropicales; la laterita. Se trata de un suelo con una elevada capacidad de lixiviación y por lo tanto, una baja capacidad de retención de nutrientes y materia orgánica.
- **pH del suelo.** El pH del suelo es ácido (media de 5,76 en Colombia y 5,10 en Nigeria). Ello se debe a que el suelo existente en zonas tropicales es la laterita, un suelo de naturaleza ácida. Las plantas nativas presentan mecanismos de adaptación a esta acidez. También se puede utilizar cal para conseguir un pH más neutro.

6.2 Establecimiento de zonas óptimas de la Península Ibérica para el cultivo de la palma aceitera

Para conocer qué zonas de la Península Ibérica son óptimas para el cultivo de *Elaeis guineensis* se han tenido en cuenta los valores de las variables expuestas en el apartado anterior y, mediante el uso de Python, se ha obtenido una serie de mapas con un código de dos colores. Cabe recordar que en dichos mapas el color blanco representa el grupo de valores que están fuera del intervalo de aptitud, es decir, zonas de la Península que no cumplen con los requisitos de las plantaciones. El color negro representa el grupo de valores que está dentro del intervalo de aptitud y por lo tanto, marca las zonas de la Península que cumplen con los requisitos de las plantaciones.

- **Zonas idóneas en función de la altitud.** Como podemos observar en el siguiente mapa (Figura 23), únicamente ciertas zonas costeras de la Península cumplen con altitudes óptimas para el cultivo de la palma. Entre estas zonas podríamos destacar el delta del Ebro por ser el mismo tipo de formación que el delta del Níger, lugar en el que existen extensas plantaciones de *Elaeis guineensis*. A parte de las zonas de costa también aparece marcado en el mapa algunas zonas del valle del Guadalquivir.

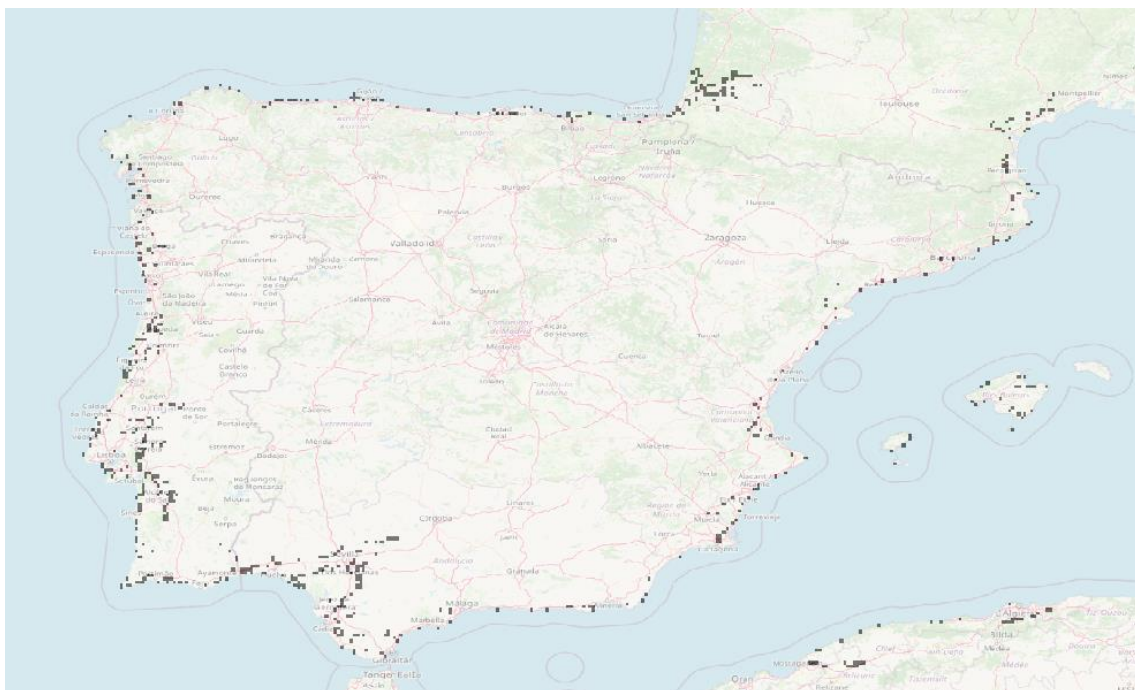


Figura 23. Zonas de la Península Ibérica con altitudes óptimas para el cultivo de palma aceitera. Fuente; Elaboración propia.

- **Zonas idóneas en función del clima (precipitaciones y temperatura).** Como queda patente en el siguiente mapa (Figura 24), ninguna localización peninsular cumple con los valores de precipitaciones existentes en las plantaciones colombianas y nigerianas de palma aceitera. Las precipitaciones en la Península son mucho menores que las de Colombia y Nigeria debido a las diferencias climáticas. Así pues, atendiendo a esta variable ninguna área peninsular sería óptima para el desarrollo de plantaciones exteriores de palma sin necesidad de suministro de riego extra.

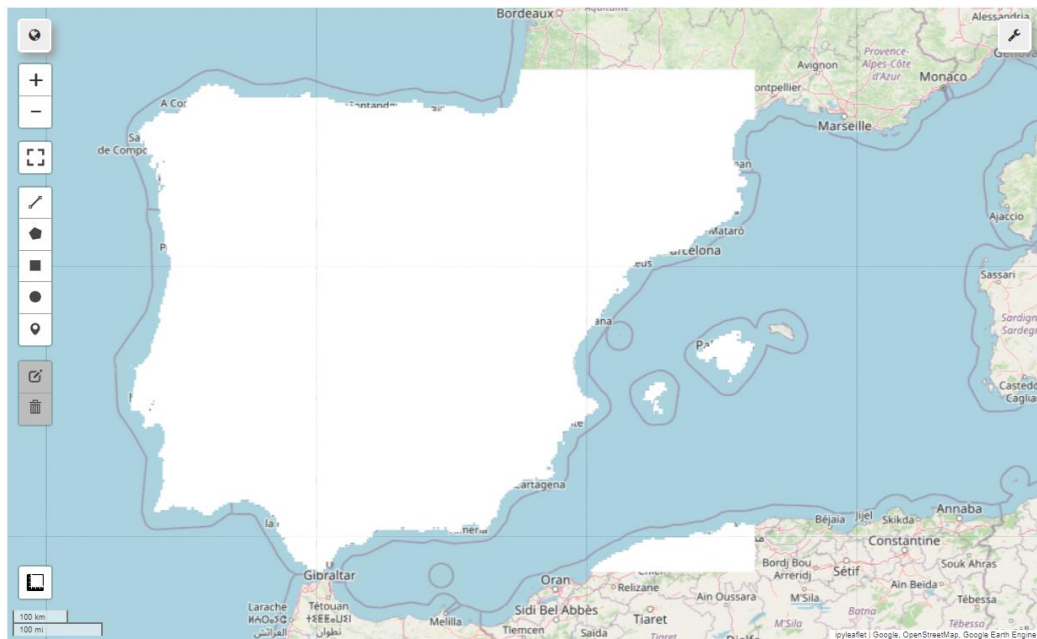


Figura 24. Ninguna zona de la Península presenta condiciones pluviométricas óptimas para el cultivo de palma aceitera. Fuente; Elaboración propia.

La diferencia climática entre Colombia/Nigeria y la Península Ibérica también queda patente en las temperaturas y es que las temperaturas mínimas en España son menores y las máximas mayores. Las bajas temperaturas del invierno supondrían un obstáculo para el cultivo de palma al exterior.

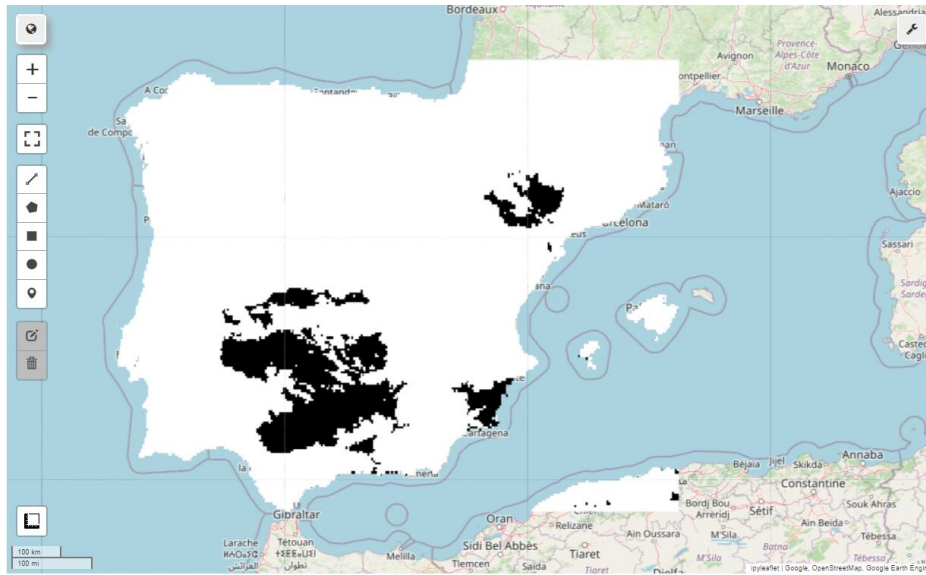


Figura 25. Marcadas de color negro, zonas de la Península con valores de temperatura máxima similares a los existentes en las plantaciones colombianas y nigerianas, dentro del periodo estudiado (primavera).

- **Zonas idóneas en función del suelo (humedad del suelo, pH del suelo y materia orgánica).** En el siguiente mapa (Figura 26) se muestran las zonas peninsulares que tienen una humedad edáfica similar a la existente en las plantaciones estudiadas. Los suelos con mayor humedad se concentran en el norte, especialmente en el noroeste ya que es la zona de mayores precipitaciones.

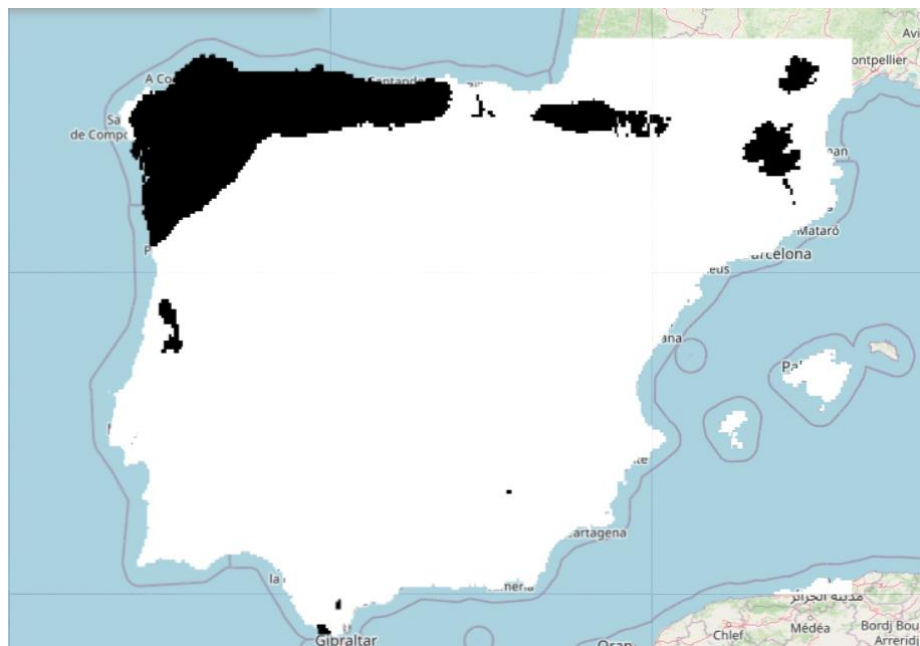


Figura 26. Marcadas de color negro, zonas de la Península con valores de materia orgánica edáfica similares a los existentes en las plantaciones colombianas y nigerianas. Fuente; elaboración propia.

Por otro lado, también es importante tener en cuenta el pH del suelo. El siguiente mapa (Figura 27) muestra las zonas de la Península Ibérica que tienen suelos ácidos, con pH similar al pH de los suelos en los que se desarrolla el cultivo de palma. Destaca que estos suelos se concentran en el norte y la mitad oeste de la Península. Esto se debe a la naturaleza silíceo del terreno de la mitad oeste peninsular.



Figura 27. Las zonas de color negro presentan pH ácidos similares a los existentes en las plantaciones de palma colombianas y nigerianas. Fuente: elaboración propia.

A parte de la humedad y el pH del suelo también es relevante la cantidad de materia orgánica que presenta. En la Figura 28 se observa que los valores óptimos de materia orgánica para el cultivo de palma aceitera los encontramos fundamentalmente en el norte y noroeste peninsular, aunque también existen muchas otras localizaciones distribuidas a lo largo de todo el territorio (Sistema Central, Sistema Ibérico, etc.).

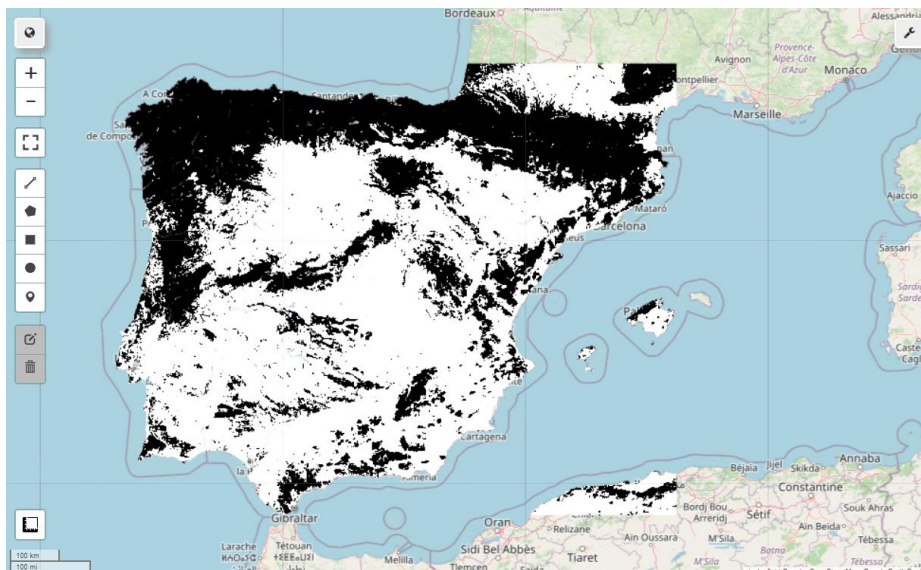


Figura 28. Las zonas de color negro presentan valores de MO similares a los existentes en las plantaciones de palma colombianas y nigerianas. Fuente: elaboración propia

7. Discusión

Como hemos visto, ninguna zona de la Península Ibérica cumple con las condiciones climáticas (precipitaciones y temperaturas) óptimas para el cultivo exterior de palma aceitera. Ahora bien, ¿Cumplen las Islas Canarias con estas condiciones? En primer lugar, cabe decir que existen numerosas e importantes variaciones climáticas entre las islas e incluso dentro de una misma isla.

De entre todas las islas la que cumple en mayor medida con las condiciones óptimas para el cultivo de la palma aceitera es la isla de La Palma ya que en ciertas zonas tiene un clima subtropical en el que se desarrolla la laurisilva. Sería este el lugar con las mejores condiciones para el cultivo de la palma aceitera por su elevada humedad y temperatura constante. Ahora bien, se trata de un lugar protegido de gran valor ecológico y no tendría sentido el desarrollo de este tipo de plantaciones.

Actualmente no existe ninguna plantación de *Elaeis guineensis* en territorio español. Pese a ello, cabe destacar que el Ministerio de Transición Ecológica y el Gobierno de España se sumaron a la **Declaración de Ámsterdam sobre el Aceite de Palma** para lograr una cadena de suministro de este producto de manera sostenible.

8. Conclusiones

1. Las condiciones bajo las que se desarrollan óptimamente las plantaciones de palma aceitera son; elevadas precipitaciones y temperaturas con valores típicamente asociados al clima tropical, zonas de baja altitud, planas y con nula o muy baja pendiente (fondos de valle, deltas, etc.) y suelos de pH ácido con un valor aproximado de un 5% en materia orgánica.
2. En la Península Ibérica no existen zonas óptimas para el cultivo exterior de la palma aceitera ya que las condiciones climáticas no lo permiten. Se podrían solventar estas limitaciones climáticas mediante el riego o el uso de invernaderos o instalaciones con temperatura, riego y humedad controladas, aunque ello supondría una inversión económica elevada, un uso excesivo de recursos hídricos y por lo tanto, una baja sostenibilidad.

3. Los biocombustibles de 2ª y 3ª generación se presentan como más sostenibles que los de 1ª ya que no existe competencia con recursos destinados a la producción de alimentos. Ello es un aspecto importante en un mundo en el que la evolución demográfica y las necesidades alimentarias son cada vez mayores.
4. La situación de crisis mundial actual (elevado precio del petróleo, guerra en Europa, inflación, etc.) debe servir como momento de reflexión que nos brinde una oportunidad para la sustitución de los combustibles fósiles por nuevos y eficientes biocombustibles.
5. Se requiere de una mayor inversión público-privada en investigación y desarrollo de nuevos biocombustibles y tecnologías de producción. Por otro lado, también es necesaria una mayor concienciación social al respecto.

Bibliografía

- Alejos, C., y Calvo, E. (2015). Biocombustibles de primera generación. *Revista Peruana de Química e Ingeniería Química*, 18(2), 19-30.
- Bagnato, C. (2022). Biocombustibles; el caso de las algas. Las algas como una opción alternativa y sustentable en la provisión de una forma de energía esencial: Biocombustibles de tercera generación. *Desde la patagonia. Difundiendo saberes*, 19(33), 37-41.
- Carrizo, S. C., Ramousse, D., & Velut, S. (2010). Biocombustibles en Argentina, Brasil y Colombia: avances y limitaciones. *Geograficando*, 5(5), 63-82.
- Castro-Martínez, C., Beltrán-Arredondo, L. I., & Ortiz-Ojeda, J. C. (2012). Producción de biodiesel y bioetanol: ¿una alternativa sustentable a la crisis energética?. *Ra Ximhai*, 8(3), 93-100.
- CEPAL (2012). Políticas sobre desarrollo institucional e innovación en biocombustibles en América Latina y el Caribe. *Memoria del diálogo de políticas realizado en la CEPAL*.
- Cortés-Sánchez, M. D., Gata-Montero, E. M., Pipió-Ternero, A., Rodríguez-Rivas, Á., y Sánchez-Santos, J. (2019). Biocombustibles: tipos y estrategias de producción. *MoleQla: revista de Ciencias de la Universidad Pablo de Olavide*, (35), 6.
- Cruz Alvarado, J. N. (2022). Características botánicas y climatológicas de los principales materiales de siembra de palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.), en el Ecuador. *Bachelor's thesis, UTB*.
- Del Campo Colmenar, I. (2021). Estado de desarrollo, mercado y potencial de los biocombustibles avanzados en España. *Industria química*, 91, 66-71
- Fontalvo Gómez, M., Vecino Pérez, R., y Barrios Sarmiento, A. (2014). El aceite de palma africana *Elaeis guineensis*: Alternativa de recurso energético para la producción de biodiesel en Colombia y su impacto ambiental. *Prospectiva*, 12(1), 90-98.
- Forero, D. C., Hormaza, P. A., Moreno, L. P., y Ruíz, R. (2012). Generalidades sobre la morfología y fenología de la palma de aceite. *Publicación del Centro de Investigación en Palma de Aceite (Cenipalma)*
- Freire, J. R. (2020, octubre 19). Mercado de los biocombustibles en España. Asociación Española del Bioetanol. <https://bio-e.es/biocombustibles/>
- Gonzales F. (2012). Ecofisiología de la palma aceitera. Universidad Nacional Autónoma del Salvador. 12-21.
- Isgro, M. D. L. Á. (2006). Crisis energética mundial. *Colegio Universitario Patagónico, Comodoro-Rivadavia*.
- Isgro, M. D. L. A. (s. f.). Crisis energética mundial. *Colegio Universitario Patagónico*.
- Leyva Guerrero, C. A. (2017). Revisión; biocombustibles de segunda generación. *Universidad Nacional de Trujillo*.
- Marahrens, M. (2022). Billions wasted on biofuels. Biofuels are a harmful and expensive distraction to road transport decarbonisation.

Polo Llanos, L. M. (2020). Simulación de una planta de obtención de biodiésel mediante transesterificación catalítica homogénea de trioleína de aceite de palma. *Instituto Politécnico Nacional*.

Quiros Celis, M. C. (2022). Estudio analítico de las rutas de conversión para la producción de biodiésel a partir de aceite extraído de palma africana. *Universidad de Pamplona*.

Rincón M., S. M., y Martínez C., D. M. (2009). Análisis de las propiedades del aceite de palma en el desarrollo de su industria. *Palmas*, 30(2), 11–24.

Serna, F., Barrera, L. y Montiel, H. (2011). Impacto Social y Económico en el uso de Biocombustibles. *Journal of technology management & innovation*, 6(1), 100-114.