

Universidad Pública de Navarra

**ESCUELA TECNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS AGRONOMOS**

Nafarroako Unibertsitate Publikoa

*NEKAZARITZAKO INGENIARIEN
GOI MAILAKO ESKOLA TEKNIKOA*

**METODOLOGÍA DE VERIFICACIÓN DE CAMBIOS DE USO DEL SUELO EN LA
PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES Y BIOPRODUCTOS BASADA EN
TELEDETECCIÓN**

presentado por

MIKEL VIÑUALES LASHERAS(e)k

aurkeztua

**MÁSTER EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y TELEDETECCIÓN
MASTERRA INFORMAZIO SISTEMA GEOGRAFIKOETAN ETA TELEDETEKZIOAN**

09/2016



Lourdes, allá donde estés...

Va por ti

Resumen

La Unión Europea establece unos criterios de sostenibilidad obligatorios en la producción de biocarburantes (Directiva 2009/28/CE), que son recomendados también para otros usos de la biomasa y todavía sin definir para bioproductos. Entre otros aspectos, en esa directiva se especifica que las materias primas no pueden proceder de tierras en las que se hayan producido cambios en el uso de suelo (LUC) desde 2008. El objetivo del presente trabajo es desarrollar una metodología de verificación de LUC basada en observaciones MODIS y aplicable de forma global. El estudio se centra en el estado brasileño de Mato Grosso y se basa en el uso de series temporales del índice de vegetación EVI, a partir de las cuales se han extraído parámetros que permiten caracterizar los principales usos del suelo. Los resultados obtenidos demuestran la viabilidad de la metodología desarrollada para diferenciar de forma precisa los usos del suelo estudiados.

Palabras clave: Directiva 2009/28/CE, criterios de sostenibilidad, cambios de uso del suelo (LUC), SIG, Teledetección, Brasil, EVI, MODIS.

Abstract

The European Union establishes obligatory sustainability criteria for biofuels production (Directive 2009/28/CE), which are also recommended for other uses of biomass and not yet defined for bio-based products. Among other aspects, this directive establishes that raw materials should not proceed from areas where land use changes (LUC) occurred after 2008. In this framework, the objective of this work is to develop a LUC verification methodology based on MODIS observations and applicable on a global scale. The study is focused on the Brazilian state of Mato Grosso, and is based on the use of temporal series of EVI vegetation index. These series have been processed to extract broad parameters that are descriptors of the main land uses found in the study area. The results obtained demonstrate the viability of the proposed methodology to accurately discriminate the land uses studied.

Keywords: Directive 2009/28/CE, sustainability criteria, land use change, GIS, remote sensing, Brazil, EVI, MODIS.

Índice

1	Introducción	7
1.1	Biomasa	7
1.2	Marco Legal.....	9
1.3	Herramientas de teledetección y SIG.....	13
1.4	Objetivos y alcance.....	16
2	Material y Métodos	17
2.1	Área de estudio	17
2.2	Áreas de muestreo	19
2.3	Datos MODIS	23
2.4	EVI (<i>Enhanced Vegetation Index</i>).....	24
2.5	Lenguaje R.....	27
2.6	Proceso metodológico	27
3	Resultados y Discusión.....	31
3.1	Series temporales medias	31
3.2	Separabilidad de clases.....	39
4	Conclusiones	46
5	Bibliografía.....	47
6	Anexos	51

Índice de figuras

Figura 1. Ciclo de la biomasa.....	7
Figura 2. Gráfico de economía circular	9
Figura 3. Superficie de caña de azúcar cultivada por clase en Mato Grosso	18
Figura 4. Cambios de uso del suelo en los estados centro-sur entre los años 2010 y 2012	18
Figura 5. Mato Grosso: área de estudio.....	19
Figura 6. Elección de puntos de muestreo y registro de coordenadas de un punto.....	22
Figura 7. Bandas espectrales del sensor MODIS.....	23
Figura 8. Etapas del cultivo y parámetros analizados	25
Figura 9. Imágenes MODIS con valores de EVI para Mato Grosso.....	26
Figura 10. muestra agrícola id_6 sin interpolar. A la derecha la muestra con los datos interpolados.	28
Figura 11. Ajuste de Fourier a serie temporal de la muestra id_35	29
Figura 12. Diagrama de flujo de la metodología seguida.	30
Figura 13. Serie temporal, curva suavizada mediante el análisis de Fourier y los parámetros medios obtenidos para la clase agrícola.	32
Figura 14. Serie temporal, curva suavizada mediante el análisis de Fourier y los parámetros medios obtenidos para la clase artificial.	32
Figura 15. Serie temporal, curva suavizada mediante el análisis de Fourier y los parámetros medios obtenidos para la clase agua.	33
Figura 16. Serie temporal, curva suavizada mediante el análisis de Fourier y los parámetros medios obtenidos para la clase patos naturales.....	33
Figura 17. Serie temporal, curva suavizada mediante el análisis de Fourier y los parámetros medios obtenidos para la clase pastos plantados.	34
Figura 18. Serie temporal, curva suavizada mediante el análisis de Fourier y los parámetros medios obtenidos para la clase vegetación silvestre.	34
Figura 19. Serie temporal, curva suavizada mediante el análisis de Fourier y los parámetros medios obtenidos para la clase silvicultura.	35
Figura 20. Serie temporal, curva suavizada mediante el análisis de Fourier y los parámetros medios obtenidos para la clase vegetación forestal.	35
Figura 21. Serie temporal, curva suavizada mediante el análisis de Fourier y los parámetros medios obtenidos para la clase mosaico agrícola.	36
Figura 22. Serie temporal, curva suavizada mediante el análisis de Fourier y los parámetros medios obtenidos para la clase mosaico forestal.	36
Figura 23. Serie temporal, curva suavizada mediante el análisis de Fourier y los parámetros medios obtenidos para la clase mosaico silvestre.....	37
Figura 24. Serie temporal, curva suavizada mediante el análisis de Fourier y los parámetros medios obtenidos para la clase vegetación silvestre inundada.	37
Figura 25. Serie temporal, curva suavizada mediante el análisis de Fourier y los parámetros medios obtenidos para la clase caña de azúcar.....	38
Figura 26. Diagrama de cajas para el máximo valor de EVI y día en que se produce por clase.	39

Figura 27. Diagrama de cajas para el mínimo valor de EVI y día en que se produce por clase.	40
Figura 28. Diagrama de cajas para el tiempo de subida por clase.	41
Figura 29. Diagrama de cajas para la amplitud de subida por clase.	41
Figura 30. Diagrama de cajas para EVI medio por clase.	42

Índice de tablas

Tabla 1. Superficie de caña cultivada en los estados centro-sur en el año 2013	17
Tabla 2. Descripción de los diferentes usos del suelo presentes en Mato Grosso	20
Tabla 3. N° de muestras por tamaño y clase y área total muestreada por clase	22
Tabla 4. Descripción de los valores de fiabilidad MOD13Q1	28
Tabla 5. Días de observación para cada mes.	31
Tabla 6. Máximas distancias de <i>Jeffries-Matusita</i> y parámetro con el que se obtiene.	43
Tabla 7. Resumen de la separabilidad para cada clase.	44

1 Introducción

1.1 Biomasa

Entre las diferentes áreas de actividad de las energías renovables, el presente trabajo se centra en el campo energético denominado **biomasa**. La Directiva 2009/28/CE relativa al fomento del uso de la energía procedente de fuentes renovables define la biomasa como “*la fracción biodegradable de los productos, desechos y residuos de origen biológico procedentes de actividades agrarias (incluida las sustancias de origen vegetal y de origen animal), de la silvicultura y de las industrias conexas, incluidas la pesca y la acuicultura, así como la fracción biodegradable de los residuos industriales y municipales*”. La biomasa engloba diversas materias primas de distintos orígenes y con características heterogéneas. En este grupo se pueden diferenciar: **residuos provenientes de los aprovechamientos forestales y cultivos agrícolas, residuos de podas de jardines, residuos de industrias agroforestales, cultivos energéticos, la fracción orgánica de los residuos de origen animal o humano y las micro algas** entre otros. La Especificación Técnica Europea CEN/TS 14588 define la biomasa como: “*Todo material de origen biológico excluyendo aquellos que han sido englobados en formaciones geológicas sufriendo un proceso de mineralización*” (EN 14588:2010).

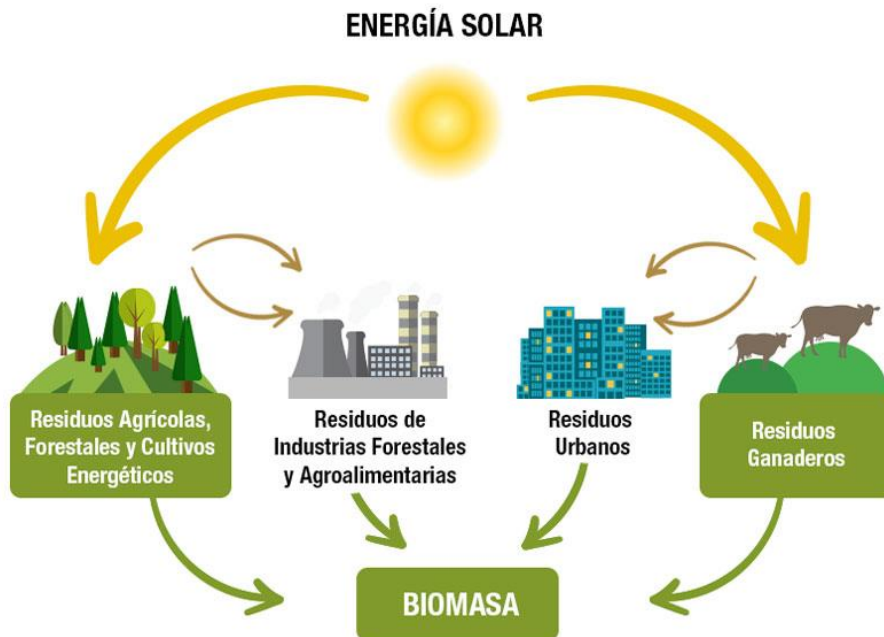


Figura 1. Ciclo de la biomasa.

Fuente: <http://lumperlux.com/energias-renovables/biomasa/>

Los **productos** obtenidos a partir de la biomasa mediante diferentes **procesos de conversión** bioquímica o termoquímica, se diferencian en cinco grandes grupos: calor y electricidad, biocombustibles, bio-productos químicos y biomateriales, productos para alimentación y bio-químicos de alto valor añadido para la industria farmacéutica.

Cabe destacar que el estado de desarrollo de obtención de cada uno de ellos se encuentra en diferentes fases, pero en cualquier caso todos estos productos forman parte del sector emergente denominado sector de la **bio-economía**. Este sector tiene en la actualidad un **volumen de negocio** de 2,1 trillones de euros (600 billones excluyendo los sectores de la agricultura, forestal, pesca, alimentación, bebidas y tabaco), y genera 18,3 millones de **empleos** en el ámbito Europeo (6,2 millones

excluyendo los sectores de la agricultura, forestal, pesca, alimentación, bebidas y tabaco) (Piotrowski et al., 2016).

En cuanto a los diferentes bio-productos generados en el sector de la economía basada en bio-productos, destacar la **bioenergía**, que está compuesta por la energía solar almacenada en los enlaces químicos entre los elementos de carbono e hidrógeno, que fijan los organismos a través de la fotosíntesis.

Mediante la combustión de **biocombustibles sólidos**, se logra generar energía en forma de **calor**, que puede ser usada directamente o puede transformarse en **electricidad**.

Las tecnologías de conversión para la producción de **electricidad**, o electricidad y calor conjuntamente (cogeneración) a partir de biomasa son la **combustión** (incluyendo la co-combustión y las plantas de combustión de biomasa), la **gasificación** de biomasa sólida y la **digestión anaeróbica** de materia orgánica para la producción de biogás. Mientras que las plantas de combustión se encuentran implantadas a nivel comercial, las plantas de gasificación no están lo suficientemente desarrolladas.

La tecnología de conversión de la biomasa para la generación de **calor** está basada principalmente en la **combustión**, pudiéndose diferenciar dos tipos de usos finales: los usos domésticos y los usos industriales (UPNa, 2015).

Por otra parte y dentro del ámbito energético, destacar los **biocarburantes**; biocombustibles líquidos utilizados para el transporte, que dependiendo del grado de procesamiento de las materias primas, están divididos en diferentes generaciones (IEA Bioenergy, 2009):

- **Primera generación (1ª)**: la tecnología se encuentra en estado de madurez y la materia prima proviene de cultivos agrícolas. Por un lado, la producción de bioetanol se obtiene a partir de la fermentación de azúcares y almidón de ciertos cultivos (caña de azúcar, remolacha, sorgo dulce, granos de trigo, cebada...). Por otro lado, la producción de biodiesel se realiza a partir de los aceites de los cultivos de soja, palma, colza y girasol entre otros, y a partir de grasas vegetales y animales. Por último la producción de biometano se consigue a partir de la digestión anaeróbica de biomasa húmeda.
- **Segunda generación (2ª)**: las materias primas utilizadas no compiten con la producción de alimentos y engloban un amplio rango de biocombustibles basados en nuevas materias primas y residuos. En este grupo se incluyen el bioetanol y biodiesel producidos a partir de nuevos cultivos como pueden ser *Jatropha*, *Cassava* o *Miscanthus*. Así como, los producidos a partir de biomasa lignocelulósica y residuos agrícolas, forestales y de las industrias agroalimentarias entre otros. Estas tecnologías están en fase de desarrollo.
- **Tercera generación (3ª)**: son biocombustibles que están en las primeras etapas de desarrollo y se obtienen a partir de algas e hidrógeno. Este grupo tampoco compete con la producción de alimentos.

A modo comparativo, citar que los combustibles de 2ª y 3ª generación se obtienen a partir de materias primas como residuos o biomasa lignocelulósica, que no compiten con la producción de alimento. Uno de sus principales objetivos es producir menores emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que los combustibles de 1ª generación, y que el combustible fósil al que reemplazan.

Por lo tanto, la biomasa es un vector energético que puede contribuir al aporte de las demandas energéticas futuras de una manera sostenible, a la reducción de GEI, a la reducción de la dependencia de combustibles fósiles, al desarrollo de las zonas rurales y a la mejora de la gestión de los residuos mediante su reutilización (IDAE, 2007; IEA Bioenergy, 2009).

Por último, los **bioproductos** se obtienen de manera parcial o en su totalidad de materiales de origen biológico, excluyéndose de este grupo los materiales embebidos en formaciones geológicas y/o fosilizadas. La ventaja de estos productos respecto a los convencionales, radica en buscar una producción más sostenible y mejorar las funcionalidades, reduciendo de este modo el uso de energía y emisión de GEI (European Union, 2012).

1.2 Marco Legal

En un marco general, debido al aumento mundial de la población, la rápida disminución de muchos recursos junto al incremento de las presiones medioambientales y de cambio climático, Europa necesita promover un cambio radical en el modelo de producción, consumo, transformación, almacenamiento, eliminación y reciclaje de los recursos biológicos. En este contexto se ha diseñado la **Estrategia Europea 2020**, en la que se remarca la bioeconomía como sector clave en el marco Europeo de **Economía circular**. Esta transición hacia una economía circular, favorecerá que el valor de los productos, materiales y los recursos se mantengan en la economía durante el mayor tiempo posible, reduciendo al mínimo los residuos generados. De este modo, se logrará crear una sociedad basada en una economía sostenible, con menos emisiones de GEI, eficiente en el uso de los recursos y competitiva (COM/2015/0614 final). En este sentido, la biomasa como materia prima tiene un rol clave en la producción de bioproductos y energía (COM/2012/060 final).

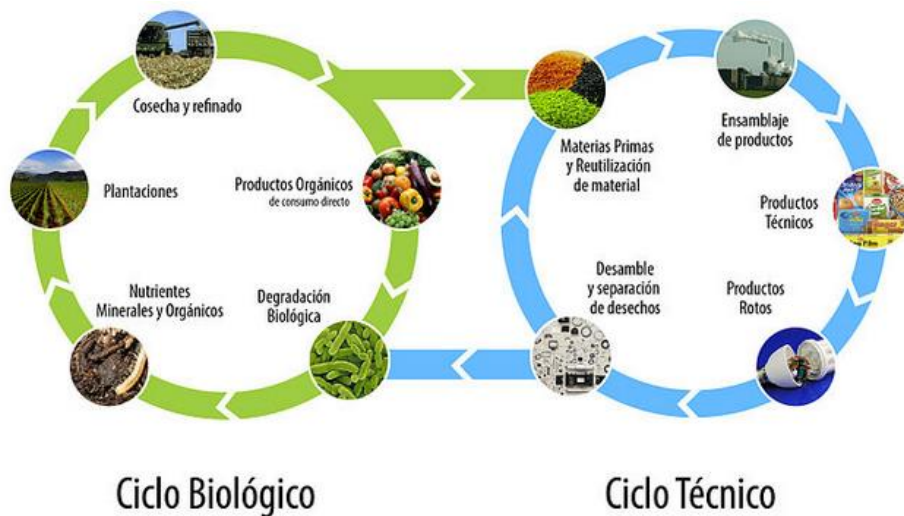


Figura 2. Gráfico de economía circular.

Fuente: <http://innodriven.com/la-economia-circular/>

De este modo, la **Estrategia de Bioeconomía** y su Plan de Acción pretenden impulsar un crecimiento inteligente y ecológico en Europa, utilizando de manera más eficiente los recursos, compatibilizando la seguridad alimentaria y el uso sostenible de recursos renovables con fines industriales, asegurando de este modo una protección del medio ambiente. Sin embargo, las interdependencias existentes entre los diferentes retos, puede ocasionar conflictos entre los mismos, como la controversia sobre los usos que compiten entre sí por la biomasa, tanto en Europa como en terceros países (COM/2012/060 final).

En este sentido, dentro de la coyuntura energética de la última década, en el año 2009 se publicó la **Directiva 2009/28/CE** relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables, para definir los objetivos y criterios a cumplir en el ámbito de las energías renovables en Europa. La directiva es parte del denominado **Paquete**

Europeo de Energía y Cambio Climático, que establece las bases para que la UE logre sus objetivos para 2020 (denominados objetivos 20/20/20): un 20% de mejora de la eficiencia energética, una contribución de las energías renovables del 20% y una reducción de las emisiones de GEI del 20% (IDAE, 2011). Además, establece un objetivo vinculante mínimo del **10 %**, para todos los Estados miembros, con relación al porcentaje de biocarburantes sobre el conjunto de los combustibles (gasóleo y gasolina) de transporte consumidos en 2020 (Directiva 2009/28/CE).

Estos objetivos son ambiciosos e innovadores para Europa, ya que, la economía europea depende en gran medida de los recursos fósiles como fuentes de energía y de carbono, lo que la convierte en vulnerable a la inseguridad y dependiente del suministro de otros países. Por lo que, para seguir siendo competitiva, la UE debe convertirse en una sociedad con bajas emisiones de carbono y donde las industrias utilicen eficientemente los recursos renovables.

Por ello, tanto la bioenergía como los bioproductos serán claves para el logro de los objetivos de crecimiento ecológico y competitividad (COM/2012/060 final). Además actualmente ya se está trabajando en el nuevo marco estratégico en materia de clima y energía para el **periodo 2020-2030**. Este, se basará en la plena aplicación de los objetivos 20/20/20 y los posibles objetivos para el año 2030 de un 45% la energía eléctrica procedente de fuentes renovables, un 40% de la reducción de los GEI y un 25% de eficiencia energética. La mejora de este último objetivo es esencial para la consecución de todos los objetivos principales de las políticas de la UE en materia de clima y energía (COM/2014/015 final).

En la Directiva 2009/28/CE se definen los **criterios de sostenibilidad** de obligado cumplimiento, para asegurar que la biomasa usada como materia prima en la obtención de biocombustibles realmente sea sostenible.

Estos criterios son de obligado cumplimiento para los **biocarburantes u otros combustibles líquidos** renovables en el transporte:

(65) *“La producción de biocarburantes debe ser sostenible. Los biocarburantes utilizados para cumplir los objetivos fijados en la presente Directiva y los que se benefician de los sistemas de apoyo nacionales deben por tanto cumplir obligatoriamente criterios de sostenibilidad”* (Directiva 2009/28/CE).

Mientras que en la actualidad, para **otros usos de la biomasa** (biomasa sólida y gaseosa en los sectores de la electricidad, la calefacción y la refrigeración) estos criterios no son de obligado cumplimiento, sino únicamente recomendados (COM/2010/0011 final y SWD/2014/0259 final). Respecto a los **bioproductos**, aunque existen diferentes grupos trabajando en este tema, todavía no se han establecido unas directrices claras, pero es probable que la CE unifique y homogenice los criterios de sostenibilidad mínimos a cumplir para los tres grupos:

(67) *“La introducción de criterios de sostenibilidad para los biocarburantes se alejará de su objetivo si los productos que no cumplen dichos criterios se utilizan como biolíquidos en los sectores de la calefacción o la electricidad, en lugar de utilizarse como biocarburantes. Por este motivo, los criterios de sostenibilidad deben aplicarse también a los biolíquidos en general”* (Directiva 2009/28/CE).

(68) *“El Consejo Europeo de marzo de 2007 invitó a la Comisión a presentar una propuesta de directiva global sobre el uso de todas las fuentes de energía renovables, que podría contener criterios y disposiciones para garantizar la producción y el uso sostenibles de la bioenergía. Estos criterios de sostenibilidad deben formar una parte coherente de un sistema más amplio que incluya a todos los biolíquidos y no solo a los biocarburantes. Por tanto, en la presente Directiva deben incluirse estos criterios de sostenibilidad. Para garantizar un enfoque coherente entre las políticas energética y medioambiental y evitar costes adicionales a las empresas y evitar las contradicciones en las normas medioambientales que resultarían de un enfoque incoherente, es*

esencial establecer los mismos criterios de sostenibilidad para el uso de los biocarburantes a efectos de la presente Directiva, por una parte, y a los de la Directiva 98/70/CE, por otra. Por los mismos motivos, debe evitarse en este contexto la duplicación de informes. Además, la Comisión y las autoridades nacionales competentes deben” (Directiva 2009/28/CE).

Como se ha mencionado anteriormente, los criterios de sostenibilidad están definidos en la Directiva 2009/28/CE, en el **artículo 17** (ver Anexo 1), que hace referencia a los “*Criterios de sostenibilidad para los biocarburantes y biolíquidos*”. De manera detallada el artículo especifica lo siguiente:

- **Reducción de las emisiones de GEI:** este requisito aplica a todos los biocarburantes y biolíquidos consumidos, incluidos los producidos a partir de desechos y residuos.
- **Usos del suelo:** estos requisitos no aplican a los biocarburantes y biolíquidos producidos a partir de desechos y residuos. Los requisitos establecidos se refieren a: protección de áreas de elevado valor en cuanto a la biodiversidad, mantenimiento de las reservas de carbono en el suelo y la protección de las turberas.
- **Buenas prácticas agronómicas.**

Como se ha citado anteriormente, en la actualidad estos criterios son de obligado cumplimiento para el grupo de los biocarburantes y en el **artículo 18** de la Directiva 2009/28/CE se definen las pautas de verificación para el cumplimiento de los mismos, que se aplicarán tanto si los biocarburantes o biolíquidos son producidos en la Comunidad como si son importados.

Los **Estados miembros** deben tomar medidas que garanticen que la información presentada por los agentes económicos sea fiable y que los datos utilizados para elaborar la información estén disponibles para cualquier Estado miembro que la solicite. A su vez, los Estados miembros obligarán a los agentes económicos a que adopten las medidas necesarias y garantizar así un nivel adecuado de auditoría y también a demostrar que la han llevado a cabo. Por medio de esta auditoría se verificará que se han utilizado unos sistemas exactos, fiables y que no se han llevado a cabo prácticas fraudulentas (Directiva 2009/28/CE).

La CE velará, en particular, para que la información a presentar por los agentes económicos o los agricultores, productores y cooperativas de pequeña envergadura, no sea una excesiva carga administrativa (Directiva 2009/28/CE).

Como se puede comprobar la UE ha tomado el compromiso de convertirse en **líder mundial** de las energías renovables y ser el punto principal de desarrollo de la próxima generación de energías renovables (COM/2015/080 final). Por lo que, es imprescindible que se implementen políticas coherentes, para que se reduzcan duplicidades y mejoren la eficiencia de la innovación. De este modo se logrará abordar de manera global retos interrelacionados, como la seguridad alimentaria, la escasez de los recursos naturales, la dependencia de los recursos fósiles y el cambio climático, al tiempo que se consigue un crecimiento económico sostenible (COM/2012/060 final).

En el presente estudio se trabajará en la verificación de los **criterios de sostenibilidad** relacionados con el **uso del suelo** establecidos por la Directiva 2009/28/CE, y que son de obligado cumplimiento para biocombustibles, recomendados para otros usos, y todavía sin definir para bio-productos.

En la Directiva 2009/28/CE se especifica que no se producirán biocarburantes a partir de materias primas procedentes de tierras de elevado valor en cuanto a biodiversidad o de tierras con grandes reservas de carbono. Es decir, para que la producción de biocarburante esté certificada como renovable, los productores deben asegurar que no se han producido **cambios en el uso del suelo** (LUC, por sus siglas en inglés, land use

change) en el lugar del que procede la materia prima. Para poder determinar la existencia o no de LUC, la fecha de referencia establecida es enero de 2008, a partir de la cual se deberá determinar si ha existido o no LUC.

Dentro de las **tierras excluidas** para la producción de biocarburantes se encuentran aquellas que a fecha de enero de 2008 (fecha de referencia) pertenecían a las siguientes categorías:

- Tierras con elevado valor en cuanto a biodiversidad:
 - a) Bosques primarios y otras superficies boscosas.
 - b) Zonas designadas para la protección de la naturaleza.
 - c) Prados y pastizales con una elevada biodiversidad:
 - i) Naturales
 - ii) No naturales
- Tierras con elevadas reservas de carbono:
 - a) Humedales.
 - b) Zonas arboladas continuas.
 - c) Zonas arboladas discontinuas.
- Turberas

La protección de las tierras anteriormente citadas es total, salvo dos excepciones muy concretas. Es decir, no se puede producir o extraer materias primas de ellas en ningún caso salvo en:

- Zonas designadas para la protección de la naturaleza, las especies o los ecosistemas naturales, si se demuestra que la actividad realizada no interfiere con dichos fines de protección.
- Prados y pastizales no naturales con una rica biodiversidad, si se demuestra que la actividad realizada es necesaria para preservar su condición de prados y pastizales.

La verificación de estos requisitos relacionados con los cambios de usos del suelo plantea a los operadores finales un gran **reto** y muchos interrogantes relacionados con su aplicación práctica. La CE **no** ha establecido una **metodología detallada** para su verificación, por lo que en la actualidad existen dificultades a la hora de presentar las pruebas o evidencias (indicadores) del cumplimiento de los requisitos que van a ser aceptados por la Comisión Europea (pruebas documentales, cartográficas, etc.) (CENER, 2016). Hasta el momento cada sistema voluntario de sostenibilidad ha usado diferentes metodologías y herramientas de verificación con diferente enfoque, alcance, y calidad.

El objetivo del presente trabajo fin de máster (TFM), como se detallará posteriormente, es minimizar algunas de estas incertidumbres relacionadas con el uso del suelo desarrollando una nueva **metodología de verificación de cambios de uso de suelo**. Para ello, se estudiará el uso de técnicas de **Sistemas de Información Geográfica (SIG)** y **Teledetección** como principales herramientas de verificación.

1.3 Herramientas de teledetección y SIG

El uso integrado de teledetección y SIG puede ser una de las soluciones a la necesidad de establecer unos indicadores que permitan verificar el cumplimiento de las especificaciones dictadas por la CE respecto a los cambios de uso del suelo.

La teledetección (*remote sensing*) se conoce como la ciencia o técnica que permite obtener información de la cubierta terrestre y superficie acuosa, mediante la adquisición de imágenes desde sensores ubicados en plataformas remotas (aéreas o espaciales). Para ello, capta la radiación electromagnética emitida o reflejada por la superficie terrestre en una o más regiones del espectro electromagnético, (Campbell & Wynne, 2011). Destacar que la teledetección no se limita únicamente a procesos de obtención de las imágenes, sino, que también abarca los procesos de tratamiento e interpretación de las mismas (Chuvienco, 2010).

En el proceso de adquisición de las imágenes es imprescindible que se produzca una interacción energética entre la cubierta observada y el sensor, ya sea, mediante la reflexión de la energía solar, en este caso se hablará de sensores pasivos, o mediante un haz energético artificial o emisión propia, se hablará de sensores activos. Este flujo energético reflejado o emitido se conoce como radiación electromagnética, que es recibida por un sensor que a su vez la almacena de forma adecuada, bien a bordo del satélite o bien en las estaciones receptoras (Chuvienco, 2010).

Como principales ventajas que ofrece el uso de esta tecnología se destacan las siguientes:

- Permite obtener una **visión global** y **periódica** de la superficie terrestre. Además en condiciones comparables, es decir, con el mismo sensor, altura similar, etc.
- **Perspectiva panorámica amplia**. Esto es debido a la gran altura orbital de las plataformas espaciales, que permite detectar grandes espacios, proporcionando de este modo una amplia visión.
- Observación **multiescala** y **no destructiva**. Las variables físicas que se obtienen son equiparables entre sí. Esto permite extrapolar observaciones puntuales a ámbitos más amplios.
- Obtener información sobre **regiones no visibles del espectro**. La teledetección permite obtener imágenes sobre tipos de energía que no son accesibles al ojo humano o fotografía convencional, como puede ser el infrarrojo cercano y medio, infrarrojo térmico y microondas. Como se analizará a posteriori, estas bandas proporcionan información muy valiosa para estudios medioambientales.
- **Formato digital** (matriz de datos). Esto facilita la transmisión a los sistemas de recepción a tiempo real. Además facilita el tratamiento y procesamiento de las imágenes y la obtención de información estadística.

Haciendo referencia a las ventajas, la teledetección es una tecnología muy útil para estudios medioambientales o procesos que afecten a la superficie terrestre. Sin embargo, es necesario reconocer que presenta algunas **limitaciones**, que hacen que no sea una tecnología válida o la más eficiente en algunos casos. Sus principales limitaciones son las siguientes (Chuvienco, 2010):

- **Información** que brindan las imágenes. Mediante la teledetección solo se pueden estimar aquellas variables que influyan en el reflejo o emisión de energía de las cubiertas. Es decir, no se podrán analizar sobre una imagen, variables desarrolladas a mayor profundidad que las cubiertas, como puede ser el caso del perfil de un suelo.
- **Coste** de la información. De manera genérica, cuanto mayor sea la resolución espacial mayor será el precio de adquisición de las imágenes. Si

bien en la actualidad existe una política de libre adquisición de las imágenes de forma gratuita, como el caso de agencias espaciales como la NASA, ESA o INPE entre otras.

Son diversas las aplicaciones que ofrece esta tecnología, si bien, como ya se ha citado anteriormente, para un uso eficiente de la misma hay que contemplar las limitaciones para ver si es apta para el caso de estudio en concreto. Algunas de las aplicaciones de teledetección, dentro del ámbito medio ambiental, son:

- Desarrollo de **cartografía temática de usos del suelo**.
- Control de **ayudas de la PAC** y desarrollo de **mapas de cultivos**.
- **Desastres naturales**: identificar zonas quemadas, inundadas...
- Seguimiento de **zonas en desertificación** o **erosión**.
- Predicción de **rendimientos** de cultivo, cálculo de **necesidades hídricas** de cultivos.
- Detección de condiciones de **estrés** de la cobertura vegetal.
- Detección y afección de posibles **emisiones contaminantes** (vertidos al río, mar).
- Evolución y movimiento de las **masas de hielo polar**.

Los **SIG** (*Geographic Information System, GIS*), son sistemas diseñados para capturar, almacenar, manipular, analizar, gestionar y representar gráficamente datos espaciales o referenciados geográficamente (Chuvienco, 2010). Los SIG almacenan la información en formato digital y permiten realizar múltiples operaciones como: generar cartografía, integrar variables espaciales, modelar el relieve, análisis de vecindad etc.

La información espacial proporcionada por un SIG puede ser de gran utilidad en un análisis de teledetección. Así los SIG proporcionan información auxiliar de apoyo para los estudios de teledetección.

Esta información no espectral permite entre otras cosas corregir algunos errores incluidos en las imágenes captadas por los sensores o limitar las clases a la hora de realizar una clasificación sobre una imagen.

En este estudio se utilizará SIG para realizar las operaciones que permitan delimitar sobre un mapa los diferentes usos del suelo existentes.

Dentro del rango de aplicaciones que ofrece la teledetección, existe la posibilidad de determinar la composición de la cubierta terrestre y los cambios que en ella se producen (**LUC**, *land use change*). Esta información es clave para aplicaciones científicas y políticas dentro de ámbitos medioambientales (Wardlow et al., 2007). De este modo se han realizado numerosas investigaciones, dirigidas a la detección de diferentes tipos de cubiertas presentes en la superficie.

Tradicionalmente el procedimiento para la **detección de cambios de usos** ha sido mediante la comparación de dos imágenes de la misma zona adquiridas en dos periodos de tiempo diferentes (Lunetta et al., 2006). En este sentido sensores multiespectrales de alta resolución, como **Landsat TM/ETM+** o SPOT, son herramientas apropiadas para una clasificación detalladas de zonas a escala local, es decir, de extensión reducida (Clark et al., 2010).

Por otro lado, otro sensor utilizado es el sensor de baja resolución **AVHRR**, con el que mediante series temporales del índice de vegetación NDVI, históricamente se han

realizado clasificaciones a pequeña escala, en superficies extensas e incluso a nivel global (Wardlow et al., 2007).

Sin embargo, en la actualidad la preocupación por el cambio climático y la degradación de ecosistemas entre otros, han propiciado que la detección de cambios haya tomado relevancia. De este modo, los requerimientos de información se han extendido a escalas globales, y la información debe ser más precisa, detallada y adquirida de forma continuada en el tiempo (series temporales). Por lo que, los sensores a utilizar deben permitir la obtención de amplias superficies, con alta resolución temporal, una adecuada resolución espacial y a mínimo costo (Wardlow et al., 2007).

En este sentido, los sensores previamente comentados cumplen algunas de las características, pero presentan ciertas limitaciones al respecto. Por un lado, los sensores de alta resolución, para el seguimiento de grandes extensiones, requieren descargar gran cantidad de imágenes y además su baja resolución temporal dificulta el seguimiento de los procesos. En zonas con presencia de nubes, como en las zonas estudiadas en este trabajo, esto puede ser un gran problema (Wardlow et al., 2007; Clark et al., 2010). Por otro lado, la baja resolución espacial del sensor AVHRR (1 km), imposibilita que la información derivada de este sensor sea a detalle. Además, este sensor no fue diseñado para realizar este tipo de aplicaciones (Zhang et al., 2003).

Estos requerimientos han potenciado el uso de información derivada del sensor **MODIS** (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*). Este sensor permite caracterizar amplias zonas de superficie, con una alta resolución temporal (1-2 días), en una resolución espacial intermedia (250 m) y sin costo alguno. Además, MODIS ofrece diferentes productos ya procesados con algoritmos rigurosos y con una resolución temporal dada, por lo que diversos investigadores han utilizado información derivada de este satélite en sus investigaciones.

Así, (Wardlow et al., 2007; Brown et al., 2013) evaluaron la aplicabilidad de índices de vegetación de series temporales MODIS para la clasificación cultivos. Por otro lado, (Lunetta et al., 2006) utilizaron series multi temporales de NDVI del sensor MODIS para evaluar la detección de cambios de cubiertas del suelo, mientras que (Galford et al., 2008) se basaron en series temporales MODIS para detectar la expansión e intensificación de cultivos en Brasil. Otros estudios (Clark et al., 2010) investigaron la precisión y capacidad de series temporales MODIS para estimar mapas de las cubiertas observadas.

Vista la potencialidad de este sensor, el aumento del uso de las series temporales, el libre acceso a los datos y la conclusión de algunas investigaciones, en las que se observa que la resolución espacial del sensor (250m) es adecuada para determinar diferentes cubiertas (Wardlow et al., 2007), en el presente trabajo se utilizarán datos adquiridos mediante el sensor MODIS. Más concretamente se trabajará con **series temporales del índice de vegetación EVI** (*Enhanced Vegetation Index*).

En el apartado de biomasa, se ha detallado la necesidad de identificar los cambios de usos de suelo y las dificultades que dicha verificación presenta. Por lo que, el presente trabajo pretende desarrollar una metodología que permita solventar estas incertidumbres existentes para certificar, en lo que a LUC se refiere, la procedencia de las materias primas utilizadas como biomasa. Hasta la actualidad se tiene conocimiento de la herramienta **GRAS** (*Global Risk Assessment Services*) desarrollada por Meo Carbon Solutions y DLR (*German National Aeronautics and Space Research Center*) y financiada por el Gobierno Alemán. Esta herramienta permite llevar a cabo la verificación de algunos de los criterios de sostenibilidad y de los cambios de uso de suelo en particular. La problemática que presenta esta herramienta es que el módulo para el cálculo de cambios de usos del suelo de GRAS no es de acceso público, sino que las consultas se realizan bajo pedido a un coste determinado. Además, para realizar estas consultas hay que conocer el origen específico de la biomasa, siendo necesario

detallar las coordenadas centrales de la zona en la que se realizará la detección de cambios de uso de suelo.

1.4 Objetivos y alcance

En el presente trabajo, como objetivo **general**, se pretende explorar la utilidad de herramientas SIG y teledetección en el ámbito de las Energías Renovables, más concretamente en el ámbito de la Bioenergía y los bioproductos. De manera más específica, el **principal objetivo** del trabajo es el de desarrollar una nueva metodología que permita verificar los cambios de usos de suelo mediante herramientas de software libre de SIG y teledetección.

Como se ha citado anteriormente, GRAS ofrece una posible metodología de verificación de cambios de usos del suelo. Pero esta herramienta presenta una gran limitación desde una perspectiva práctica, ya que, para poder realizar el pedido se debe conocer la parcela de procedencia de la biomasa y como se especificó anteriormente, en múltiples ocasiones esto resulta inviable. No sin esfuerzo, en ocasiones se podría llegar a detallar el municipio de procedencia de la biomasa (CENER, 2016). Es por ello, que para dar respuesta a las necesidades reales del sector, la metodología a desarrollar debe poder determinar los cambios de usos del suelo a una mayor superficie que la parcela de procedencia.

De este modo, con el objetivo de crear una metodología que dé respuesta a un problema existente en el sector de la biomasa, se propone en este trabajo desarrollar una metodología de verificación de cambios de uso de suelo que consta de tres fases:

- Fase I → elección de la zona de estudio para la que se procederá a la descarga y procesamiento de las series temporales datos.
- Fase II → obtención de parámetros que permitan caracterizar los diferentes usos. Posteriormente se procederá a realizar un clasificador.
- Fase III → validación de la metodología y extrapolación a otras zonas.

Debido al tiempo disponible para realizar este TFM, en el presente trabajo se abordará de forma integral la primera fase de la metodología propuesta, realizando además, de forma complementaria, un estudio preliminar de algunos parámetros de la segunda fase.

2 Material y Métodos

2.1 Área de estudio

La zona elegida para realizar el estudio está ubicada en el centro sur de **Brasil**, ya que este país es el **mayor productor mundial de caña de azúcar**. Datos de la FAO muestran que en el año 2013 la producción brasileña alcanzó los 739 millones de toneladas de caña de azúcar, un 54% más que India, que con una producción de 341 millones de toneladas en 2013, es el segundo productor mundial y más del 80% respecto a los cuatro productores siguientes: China, Tailandia, Pakistán y México (FAO, 2016).

La creciente demanda de caña de azúcar para la producción de etanol y la introducción en el mercado de vehículos de combustible flexible (*Flex Cars*) ha supuesto una rápida expansión de este cultivo en Brasil a partir del año 2003. El cultivo se establece en la zona norte y centro-sur del país, siendo esta última zona la principal contribuyente a la producción total (Adami et al., 2012; Rudorff et al., 2010). Los estados productores de la zona centro-sur son: Goiás (GO), Mato Grosso (MT), Mato Grosso do Sul (MS), Minas Gerais (MG), Paraná (PR) y São Paulo (SP). Estos seis estados son los responsables del 90% de caña de azúcar producida en Brasil, destinada a la industria azucarera o a la industria de etanol (Adami et al., 2012).

En la Tabla 1 se muestran las superficies cultivadas con caña de azúcar para el año 2013, constatando que el estado de São Paulo es el principal productor y Mato Grosso, el estado con menor extensión.

Tabla 1. Superficie de caña cultivada en los estados centro-sur en el año 2013 (INPE, 2016).

Estado	Superficie (ha)
São Paulo	5.045.890
Minas Gerais	856.916
Goiás	852.717
Mato Grosso do Sul	699.202
Paraná	627.454
Mato Grosso	272.461

Entre estos seis estados, el **seleccionado** como zona de estudio ha sido **Mato Grosso (MT)** debido a los siguientes motivos:

- Teniendo en cuenta la información de usos del suelo descargada del *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística* (IBGE), todos los usos del suelo están presentes en MT y su distribución en la mayoría de los casos es heterogénea.
- El incremento de producción de caña no ha sido exponencial en MT, por lo que, se piensa que en un futuro puede ser susceptible de cambios de uso del suelo para producción de caña de azúcar. Existen precedentes para pensar en la hipótesis de futuros cambios, ya que, históricamente ha sido una zona donde se ha realizado el cambio de ecosistemas forestales y sabanas para la producción de pastos para el ganado (Galford et al., 2008).

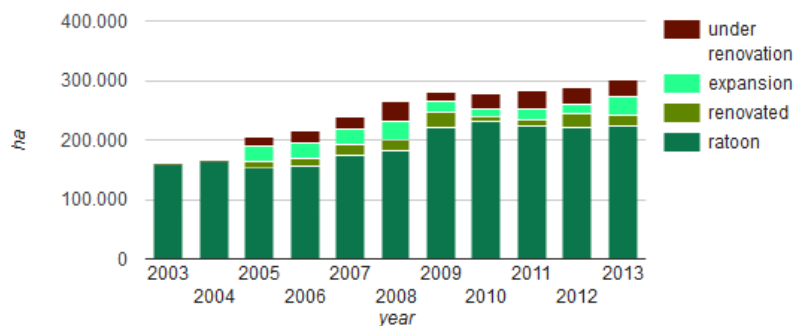


Figura 3. Superficie de caña de azúcar cultivada por clase en MT.
Fuente: (INPE, 2016).

- Tomando como base la información vectorial descargada del *IBGE*, se rasterizaron en el software ArcGIS las capas vectoriales de los años 2010 y 2012. Posteriormente se realizó una resta entre ambos mapas y se obtuvo que MT es uno de los estados, junto con GO y MG, donde mayor cambio de uso del suelo ha habido. Estas zonas de cambios podrán ser seleccionadas como muestras de test o validación de la metodología planteada.

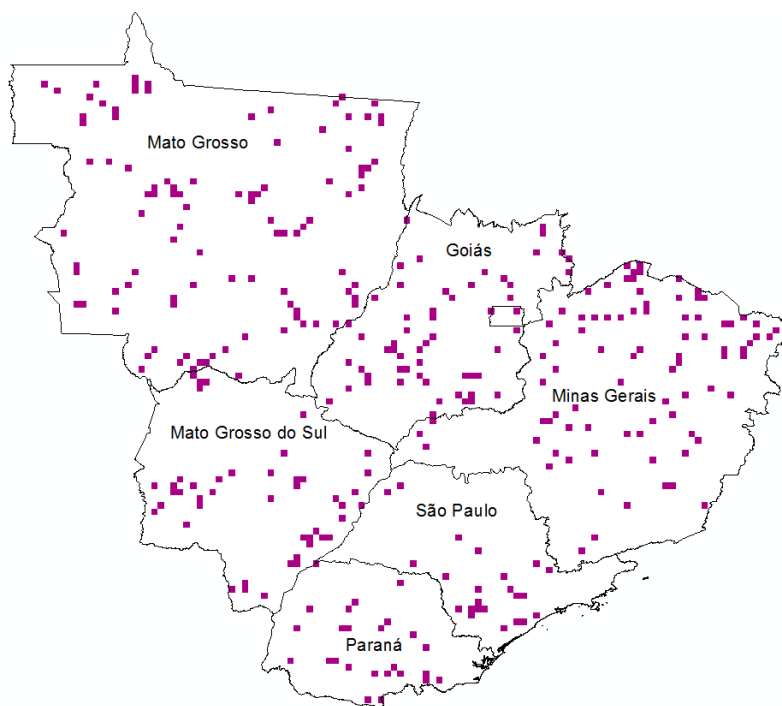


Figura 4. Cambios de uso del suelo en los estados centro-sur entre los años 2010 y 2012. Los píxeles a color representan zonas donde se ha producido algún tipo de cambio de uso.

El estado de **Mato Grosso** está formado por 141 municipios y la capital es Cuiabá. Ocupa un área aproximada de 900.000 km² y limita en el norte con los estados de Amazonas y Pará, al este con Tocantins y Goiás, al sur con Mato Grosso do Sul y al oeste con Rondônia y el país vecino de Bolivia.

El estado se encuentra dividido en tres unidades bio-administrativas. La parte sur del estado, conocida como el Pantanal (61,726 km²), es una región con humedales tropicales. En la zona norte se encuentran los bosques húmedos amazónicos (481,129 km²) y en la parte central, denominada cerrado (360,008 km²), domina la presencia de grandes sabanas tropicales (Brown et al., 2013).

El clima es caluroso, semi-húmedo a húmedo, con una precipitación anual entre 1300 y 2300 mm y una marcada estación seca desde mayo hasta octubre (invierno). Según la clasificación de Köppen, el estado se encuentra en la región climática Aw (clima tropical de sabana).

La mayoría de los suelos del estado, especialmente en la región de Cerrado, son suelos antiguos, profundos y pobres en nutrientes. Pero debido al aporte antrópico de fertilizantes, se han extendido las tierras de cultivo y se ha convertido a MT en una de las “despensas” de alimentos de Brasil, siendo la soja el principal cultivo (Brown et al., 2013).



Figura 5. A la izquierda, ubicación de Mato Grosso, fuente: elaboración propia.

A la derecha, estado de Mato Grosso, fuente: <http://www.v-brazil.com/>.

2.2 Áreas de muestreo

Destacar que la problemática planteada en este trabajo es de un alcance global y en este tipo de trabajos es muy difícil (costo y/o tiempo y/o acceso) disponer o realizar muestreos de campo. Para realizar este trabajo no se pudieron obtener datos de campo, para poder fijar las áreas de muestreo, se descargaron del portal de cartografía del IBGE (IBGE, 2016) archivos vectoriales con información referida a los usos del suelo de Brasil. Con el apoyo de esta información y mediante fotointerpretación a partir de imágenes satelitales disponibles en diferentes visores (ver Figura 6), se establecieron diez áreas de muestreo para cada tipo de uso de suelo analizado. Estas áreas de muestreo estaban repartidas en todo el estado de Mato Grosso.

En el portal del IBGE se disponía de información de usos del suelo del año 2010 y del 2012. En esta fase se optó por trabajar con el año 2010, dejando la información del 2012 para una siguiente fase del proyecto en la que se tratará de detectar zonas de cambio y validar los resultados.

En la Tabla 2 se describen las trece clases en las que se clasifican los usos del suelo del estado de Mato Grosso en la cartografía del IBGE.

Tabla 2. Descripción de los diferentes usos del suelo presentes en Mato Grosso (IBGE).

Clase	Uso del suelo	Descripción
-	Área descubierta	Incluye las áreas de afloramientos rocosos, peñascos, rocas y arrecifes, áreas con procesos de erosión activos. Incluye áreas de extracción abandonadas y sin vegetación, áreas donde el 75% de la superficie terrestre está cubierta por rocas, bloques y escombros. También incluye las áreas de formación de dunas (interior y lacustres, dunas móviles sin vegetación, dunas estabilizadas o colonizadas, campo de dunas continental).
1	Área agrícola	Más del 75% del polígono está ocupado por cultivos temporales y cultivos permanentes, de regadío o no. Puede ser definida como tierra utilizada para la producción de alimentos, fibras y materias primas de agro industria. Incluye todas las tierras cultivadas, caracterizadas por el delineamiento de áreas cultivadas o en descanso (barbecho), pudiendo comprender también áreas cultivadas inundadas. Se pueden constituir en zonas agrícolas heterogéneas o representar extensas áreas de plantaciones.
2	Área artificial	Más del 75% del polígono está ocupado con uso urbano, estructurado por edificaciones y sistema viario, donde predominan superficies artificiales no agrícolas. Están incluidas en esta categoría las metrópolis, ciudades, villas, áreas de carreteras, servicios y transporte, redes de energía, comunicaciones y terrenos asociados, áreas ocupadas por industrias, complejos industriales y comerciales y edificaciones que pueden en algunos casos encontrarse aisladas en áreas peri urbanas. También pertenecen a esta clase aldeas indígenas y áreas de labra de minería. Las áreas urbanizadas pueden ser continuas, donde las áreas no lineales de vegetación son excepcionales o discontinuas, donde las áreas vegetadas ocupan superficies más significativas.
3	Cuerpo de agua continental	Incluye todas las aguas interiores como cursos de agua y canales (ríos, riachuelos, canales y otros cuerpos de agua lineales), cuerpos de agua naturalmente cerrados, sin movimiento (lagos naturales regulados) y reservorios artificiales (represas artificiales de agua construidos para riego, control de inundaciones, abastecimiento de agua y generación de energía eléctrica).
4	Pastos naturales	Área ocupada por vegetación silvestre (natural) sujeta a pastoreo y otras interferencias antrópicas de baja intensidad.
5	Pastos plantados	Área predominante ocupada por vegetación herbácea cultivada destinada a pasto para rebaños. Son áreas destinadas al pastoreo de ganado u otros animales, formadas mediante plantación de forrajes perennes, sujetos a interacciones antrópicas de alta intensidad como limpieza de tierra (destoconar o desempedrar).
6	Vegetación silvestre	Área en la que más del 75% del polígono está ocupado por formaciones no arbóreas. Se entienden como áreas silvestres las diferentes categorías de vegetación fisionómicamente bien diferenciadas frente a la forestal, es decir, aquellas que se caracterizan por un estrato predominante arbustivo, expresamente distribuido sobre un tapete gramíneo-leñoso. Se incluye en esta categoría las Sabanas, Estepas, Sabanas-Esteparias, Formaciones Pioneras y Refugios ecológicos. Se encuentran diseminadas por diferentes regiones fitogeográficas.
7	Silvicultura	Área con actividad de cultivo forestal plantada con especies exóticas. El área de esta clase deberá contener más del 75% del polígono ocupado como silvicultura.
8	Vegetación forestal	Más del 75% del polígono ocupado por forestal. Se considera como forestal las formaciones arbóreas con porte superior a 5 metros, se incluyen las fisionomías de Bosque Denso (estructura forestal con cobertura superior continua), Bosque Abierto (estructura forestal con diferentes grados de discontinuidad de cobertura superior, conforma a su tipo (con liana, bambú, palmera o "sororoca")), Bosque Estacional (estructura forestal con pérdida de hojas de los estratos superiores durante la estación desfavorable (seca y fría)) así como Bosque Ombrófilo mixto (estructura forestal que comprende el área de distribución natural de <i>Araucaria angustifolia</i> , elemento excepcional en los estratos superiores, que generalmente forman cobertura continua) y de áreas de "manges". Esta clase incluye áreas remanentes primarias y etapas desarrolladas de recomposición forestal ("capoeiroes/capoeiras") de diversas regiones fitogeográficas consideradas como forestales.
9	Mosaico agrícola con remanentes forestales	Área en ambiente forestal que contenga más del 50% y menos del 75% del polígono ocupado por área agrícola y lo restante del polígono con remanentes,

		regeneración forestal, pastos. Pueden ocurrir en menor proporción otras formaciones vegetales (herbáceas o arbustivas).
10	Mosaico forestal con áreas agrícolas	Área creada en una clasificación que contenga del 50% hasta 75% del polígono ocupado con vegetación forestal y lo restante del polígono como área agrícola.
11	Mosaico de vegetación silvestre con área agrícola	Área que el polígono contenga más del 50% y menos del 75% ocupado con vegetación silvestre y el resto del polígono con mosaicos de cultivos temporales de regadío o no, cultivos permanentes, pastos y/o silvicultura.
12	Vegetación silvestre inundada	Área ocupada por vegetación natural herbácea (cobertura del 10% o más), permanentemente o periódicamente inundada por agua dulce o salada (estuarios, pantanos...). Incluye las áreas de charcos, pantanos, campos mojados/húmedos... El periodo de inundación debe ser de un mínimo de 2 meses al año. En estas áreas puede haber vegetación arbustiva o arbórea siempre que ocupe un área inferior al 10% del total.

De estas trece clases de usos del suelo se decidió **analizar doce**, descartando el área descubierta, ya que, su presencia en Mato Grosso es puntual. Es necesario destacar que varias de estas clases tienen, a priori, un alto grado de heterogeneidad, como por ejemplo la clase 1 (agrícola) o las clases 9-11 (mosaicos de diferentes cubiertas), lo que puede suponer una mayor dificultad para su correcta clasificación. También hay otras que pueden resultar cercanas a nivel fisiológico, como pueden ser las clases 4 y 5 (pastos naturales y plantados) o las clases 7 y 8 (silvicultura y vegetación forestal), pero que debido a la intervención antrópica muestren algunas diferencias, dificultando su identificación.

A estas doce clases de usos del suelo se añadió una última, la **caña de azúcar** (clase 13), debido a su interés como cultivo energético. Desde el proyecto CANASAT (INPE, 2016) se facilitó un archivo vectorial con la ubicación de áreas agrícolas cultivadas con caña de azúcar en el estado de Mato Grosso para los años 2010, 2011 y 2012. El proyecto CANASAT realiza desde 2003 cartografía de las áreas agrícolas cultivadas con caña de azúcar en la zona centro-sur de Brasil a partir de imágenes Landsat (Rudorff et al., 2010).

Se registraron 10 áreas de muestreo para cada uso del suelo, por lo que, serán 130 muestras en total.

Como herramientas para la ubicación de las coordenadas centrales de los puntos de muestreos se han utilizado:

- Google Earth
- Google Maps.
- Visor de Global Forest Watch (GFW, 2016). Permite superponer una capa de usos del suelo del año 2009 sobre imágenes Google.

Para delinear las áreas de muestreo se utilizó la técnica de interpretación visual (Clark et al., 2010; Rudorff et al., 2010; Dong et al., 2012). Los pasos realizados fueron los siguientes: mediante el archivo vectorial se reconocieron las posibles zonas de ubicación de los diferentes usos del suelo y se procedió a su verificación, ubicación y marcado en Google Earth. Posteriormente con Google Maps se obtuvieron las coordenadas geográficas exactas. Caso de existir alguna incertidumbre para identificar la zona, se contó con el visor de Global Forest Watch para la toma de decisión. Por último, se introdujeron las coordenadas en el software ArcGIS y una vez comprobado que los puntos estaban incluidos en los límites marcados por la capa vectorial, se registraron como puntos de muestreo (Anexo 2).



Figura 6. Elección de puntos de muestreo (izquierda) y registro de coordenadas de un punto (derecha).

Citar que estos pasos se han aplicado en todos los usos del suelo exceptuando la vegetación silvestre y el cultivo de caña de azúcar, ya que, con la experiencia del interprete era imposible detectar estos usos, por lo que, para estos casos se utilizaron directamente las coordenadas obtenidas de la capa vectorial.

En este proceso, además de especificar la coordenada central del área de muestreo, también se ha identificado la superficie de muestreo que será seleccionada bajo el criterio de evitar píxeles mezclados. Se han establecido **dos tamaños de muestreo**:

- 250 m² (1 píxel MODIS) → En pequeñas áreas donde aumentar el tamaño puede llevar a incluir píxeles de otros tipos de usos.
- 5,0625 km² (9x9 píxeles MODIS) → Se tendrá en cuenta el píxel central y un kilómetro hacia el norte, sur, este y oeste. Este muestreo se realizará en grandes áreas homogéneas y de este modo se conseguirá un mayor número de píxeles como muestra.

En la siguiente tabla, se muestra la superficie total muestreada para cada clase:

Tabla 3. Número de muestras por tamaño y clase y área total muestreada por clase

Clase	Nº muestras 250 m ²	Nº muestras 5.0625 km ²	Superficie total km ²
1	0	10	50,625
2	8	2	10,127
3	10	0	0,0025
4	2	8	40,5005
5	8	2	10,127
6	2	8	40,5005
7	8	2	10,127
8	0	10	50,625
9	0	10	50,625
10	0	10	50,625
11	10	0	0,0025
12	0	10	50,625
13	8	2	10,127

2.3 Datos MODIS

Dentro del programa de observación global de la tierra EOS (*Earth Observing System*) la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) desarrolló el sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) para el estudio y análisis de la superficie terrestre, océanos, atmósfera y sus interacciones. Este sensor está situado a bordo de dos satélites, el EOS Terra, puesto en órbita en el año 1999, y el satélite complementario EOS Aqua, en órbita desde 2002. A partir de los datos captados por el sensor MODIS, se derivan productos con información terrestre, atmosférica y oceánica (Justice et al., 2002) y estos productos están disponibles desde el año 2000.

MODIS fue el primer sensor hiperespectral lanzado al espacio, si bien sus bandas no son continuas (Chuvienco, 2010). Este sensor permite captar información espectral en 36 bandas diferentes entre el rango de 0.4 μm a 14.4 μm del espectro electromagnético (Figura 7). Es un sensor de resolución espacial moderada (*coarse resolution*) con dos bandas con resolución de 250 m, cubriendo el Rojo e IRC (infrarrojo cercano), las siguientes cinco con resolución de 500 m cubren el Verde y diversas bandas del SWIR (infrarrojo de onda corta). El resto de bandas con resolución de 1 km, cubren principalmente el Visible-IRC y el IRM (infrarrojo medio) e IRT (infrarrojo térmico). La altura orbital de la plataforma es de 705 km y con una huella de barrido de 2.330 km logra una cobertura global con una resolución temporal de uno a dos días (<http://modis.gsfc.nasa.gov/>).

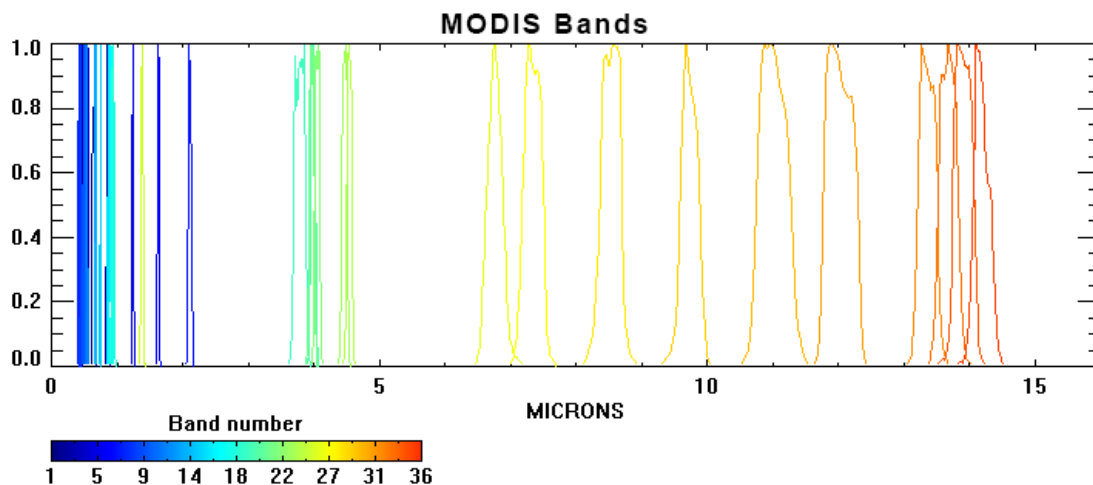


Figura 7. Bandas espectrales del sensor MODIS. Fuente: (GSP, 2016).

Los **datos utilizados** para realizar el estudio se obtuvieron del grupo de productos de superficie terrestre (*Land products*) disponibles en: <https://lpdaac.usgs.gov/>. Entre los productos disponibles se descargó el MOD13Q1, referente a los de índices de vegetación MODIS. Este producto ofrece nuevos datos con un nivel 3 de procesamiento y georreferenciados en proyección sinusoidal cada 16 días a una resolución espacial de 250 metros. Entre los diferentes datos disponibles en este trabajo se utilizaron dos:

- 250m 16 days EVI (MODIS_EVI). Contiene los valores del índice de vegetación EVI (*Enhanced Vegetation Index*).
- 250m 16 days pixel reliability summary QA (MODIS_Reliability). En una escala del -1 al 3 proporciona un indicador de fiabilidad de los datos anteriores.

Se descargaron todos los datos MODIS_EVI y MODIS_Reliability disponibles (23 observaciones) para el año 2010, por lo que se contó con una serie anual completa para cada muestra, es decir, un total de 23 observaciones para cada área de muestreo.

2.4 EVI (*Enhanced Vegetation Index*)

Históricamente el índice más utilizado para determinar el vigor de la vegetación a partir de observaciones multiespectrales ha sido el índice de vegetación NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*). Este índice fue propuesto por Rouse et al. (1974) y desde entonces ha sido utilizado ampliamente. En la actualidad multitud de sensores permiten su determinación, entre otros el sensor AVHRR que ofrece una serie global histórica continua de NDVI desde el año 1980 (Bradley et al., 2007).

No obstante, el índice de vegetación NDVI presenta el inconveniente de ser más sensible que otros frente a la clorofila y sobre todo tiende a saturarse a niveles altos de cobertura vegetal (Wardlow, et al., 2007; Atkinson, et al., 2012), además presenta cierta influencia de la reflectancia proveniente del suelo y atmósfera. Por todo ello, Huete et al. (2002) presentaron el índice de vegetación EVI (ec. 1), como una alternativa al NDVI, ya que, se mantiene robusto frente a las influencias del suelo y atmósfera y tiene un umbral de saturación menor (Chuvieco, 2010; Wu et al., 2014). El EVI se calcula a partir de (Huete et al., 2002):

$$EVI = G \frac{\rho_{IRC} - \rho_{rojo}}{\rho_{IRC} + C_1 \rho_{rojo} - C_2 \rho_{azul} + L} \quad (1)$$

Donde, L es la radiancia del fondo, G es un factor de ganancia y C_1 y C_2 son los coeficientes para corregir la influencia de aerosoles en la banda roja a partir de la azul. En MODIS, $L = 1$, $C_1 = 6$, $C_2 = 7,5$ y $G = 2,5$.

Como ya se ha mencionado, los índices de vegetación permiten estimar el vigor de la vegetación, que será proporcional a su valor. Por tanto, a partir de los valores de EVI se puede obtener información sobre la fenología o etapas de desarrollo de la vegetación. Las etapas principales en un ciclo vegetal, o estados fenológicos, son cuatro (Zhang et al., 2003):

- **Comienzo del ciclo** del cultivo, está relacionado con el comienzo de la actividad fotosintética, por lo que, el valor de EVI comenzará a aumentar.
- **Madurez** del cultivo, corresponde con los valores máximos de EVI.
- **Senescencia** del cultivo, la fecha en la que la actividad fotosintética y el área foliar comienza a disminuir, es decir, el valor de EVI comenzará a disminuir.
- **Dormancia**, es el periodo en el que la actividad fotosintética es cercana a cero. En este caso el valor de EVI será el mínimo posible.

Estás cuatro etapas permiten caracterizar la fenología de las cubiertas vegetales, que puede variar en función del tipo de cubierta o uso estudiado, y por tanto ofrece información para su identificación. Sin embargo, existen otros parámetros relacionados con la fenología que se han investigado en estudios similares (Fisher et al., 2006; Bradley et al., 2007; Fisher & Mustard, 2007; Xue et al., 2013; De Castro et al., 2014; Liang et al., 2014; Wu et al., 2014), si bien muestran relación con estas cuatro etapas.

En este trabajo se trató de caracterizar las cuatro etapas mencionadas mediante siete parámetros obtenidos a partir de la serie anual de valores de EVI:

EVI_{mean} : promedio de la serie anual de EVI

EVI_{max} : valor máximo de la serie anual de EVI

EVI_{min} : valor mínimo de la serie anual de EVI

Amplitud: diferencia entre EVI_{max} y EVI_{min}

t_{max} : día del año en que el EVI es máximo

t_{min} : día del año en que el EVI es mínimo

Δt : tiempo de crecimiento de la cubierta, diferencia entre t_{max} y t_{min}

En la siguiente figura se muestran las diferentes etapas y parámetros de un ciclo vegetativo:

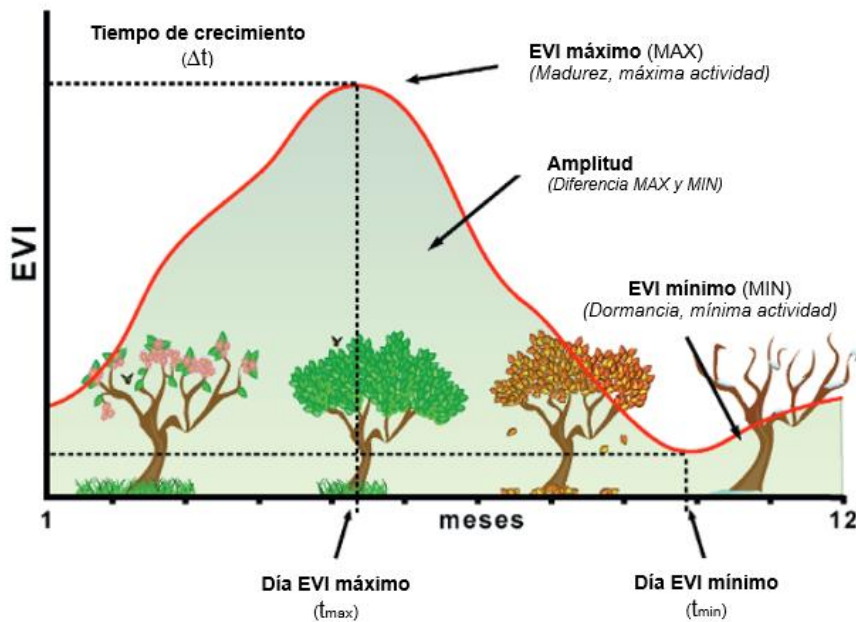


Figura 8. Etapas del cultivo y parámetros analizados.
 Fuente: adaptado de <http://www.magrama.gob.es/es/>.

En Mato Grosso, la etapa de madurez mayoritariamente se produce en el mes de enero y/o febrero y la etapa de dormancia en los meses de agosto y/o septiembre. Las siguientes dos imágenes muestran los valores de EVI en Mato Grosso para estas dos etapas.

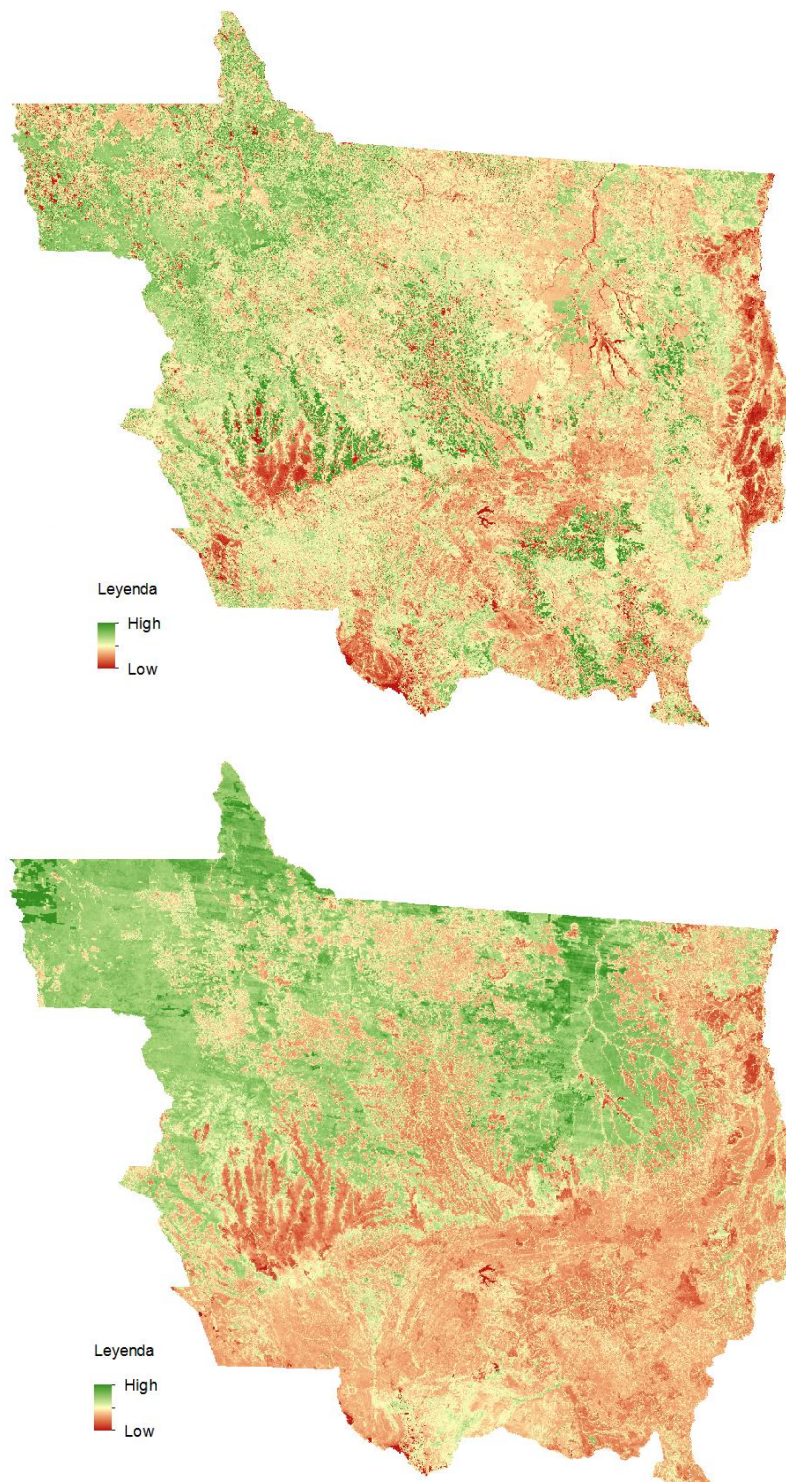


Figura 9. Parte superior: imagen MODIS con valores de EVI del 17 de enero de 2010.
Parte inferior: imagen MODIS con valores de EVI del 29 de agosto de 2010.

Como puede apreciarse, la imagen de enero (madurez) presenta un color verde más intenso que la imagen de agosto (dormancia), en la que hay más superficie de color rojo.

Respecto a la zona noreste del estado, donde predomina la vegetación forestal, la vegetación presenta mayor vigor en la imagen de agosto. Esto es debido a que la etapa de madurez de esta vegetación en la zona de estudio, suele producirse en noviembre.

2.5 Lenguaje R

El proceso metodológico se ha desarrollado con el lenguaje *R*. Este es un lenguaje y un entorno para el cálculo estadístico y diseño de gráficos. *R* permite almacenar, desarrollar y manipular conjuntos de datos y de este modo crear diferentes tipos de gráficos, analizar conjuntos de datos mediante procesos estadísticos estándares y realizar simulaciones (Militino et al., 2015).

R está disponible como Software libre bajo los términos de la *fundación [Free Software Foundation GNU General Public License](#)* y su instalación es posible en los sistemas operativos Windows, MacOS X y Linux. Para el desarrollo del código (*scripts*) se ha utilizado *Rstudio*, un entorno integrado de desarrollo (IDE) para *R*.

Al ser un software libre presenta la ventaja de que es retroalimentado por los usuarios, por lo que existen gran cantidad de paquetes (*packages*), que incluyen procesos estadísticos y funciones, desarrollados por los propios usuarios y que una vez instalados en el entorno se puede acceder a ellos cargando la librería.

En el desarrollo de este trabajo se utilizaron de manera específica tres paquetes:

- Package **MODISTools** (*MODIS Subsetting Tools*) (Tuck & Phillips, 2016).
Este paquete permite la descarga y procesamiento de datos MODIS en *R*. Además, facilita y mejora el acceso a los datos MODIS, puesto que permite la descarga de datos de manera automática (Tuck et al., 2014).
- Package **Descomponer** (*Seasonal Adjustment by Frequency Analysis*) (Parra, 2015b).
Permite descomponer series temporales en estacionales, conocer su tendencia y los componentes irregulares, mediante el uso de transformaciones en el dominio de la amplitud y frecuencia.
Entre otras cosas calcula el periodograma de la serie temporal y de este modo permite estimar los ciclos dominantes de la serie de datos.
- Package **fd** (*Functional Data Analysis*) (Ramsay et al., 2015).
Entre otras funciones, permite aplicar la descomposición de Fourier a una serie temporal de datos.

2.6 Proceso metodológico

El código (*scripts*) desarrollado en este trabajo se adjunta en el Anexo 4. En el siguiente apartado se describe el proceso realizado de una manera teórica.

En primer lugar con el paquete MODISTools se procedió a la descarga del producto MOD13Q1 de los datos de *EVI* y *Reliability* (fiabilidad de aquí en adelante) para cada punto de muestreo, teniendo en cuenta la superficie de muestreo, que fue de 9 x 9 píxeles salvo muestras adquiridas en entornos muy fragmentados, en los que se tomó 1 píxel.

El siguiente paso fue descartar aquellos datos de EVI con un indicador de fiabilidad superior a 1, asignándoles NA (*not available*) como valor de EVI, ya que corresponden a condiciones de nubosidad, nieve o hielo (Tabla 4).

Tabla 4. Descripción de los valores de fiabilidad MOD13Q1 *Pixel Reliability*. Fuente: (USGS, 2016).

Rank Key	Summary QA	Description
-1	Fill/No Data	Not Processed
0	Good Data	Use with confidence
1	Marginal data	Useful, but look at other QA information
2	Snow/Ice	Target covered with snow/ice
3	Cloudy	Target not visible, covered with cloud

En las zonas muestreadas con 9x9 píxeles se calculó la mediana de cada observación (omitiendo los valores clasificados como NA) como parámetro explicativo de toda la muestra. Con los valores de mediana se confeccionó la serie temporal anual. En aquellos casos donde la muestra era de un píxel, la serie temporal correspondía a los valores de EVI de ese único píxel (omitiendo también los valores clasificados como NA).

La presencia de nubes es habitual en Mato Grosso, por lo que al omitir aquellos valores no fiables, existe la posibilidad que en algunas muestras no esté la serie temporal completa. Es por ello, que al igual que algunas investigaciones realizadas en la zona (Galford et al., 2008; Brown et al., 2013), se realizó una interpolación lineal entre los valores anterior y siguiente al dato no disponible (Figura 10). Esta interpolación lineal se programó en un código de R.

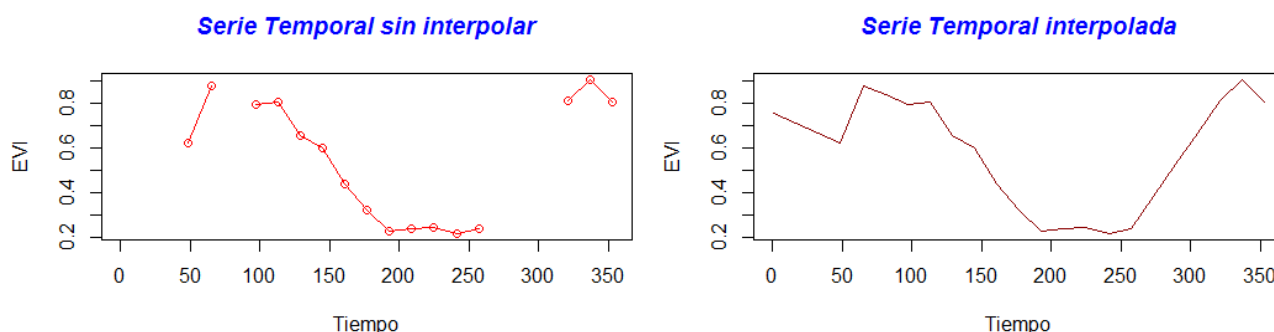


Figura 10. A la izquierda la muestra agrícola id_6 sin interpolar. A la derecha la muestra con los datos interpolados.

Posteriormente se procedió a suavizar la serie temporal. Este ajuste disminuye los posibles ruidos derivados del sensor, simplifica las series temporales y posibilita la estimación de parámetros fenológicos de forma más precisa (Atkinson et al., 2012). Aunque en ocasiones este proceso puede derivar en la introducción de nuevos errores y disminuir la importancia de algunos parámetros fenológicos (Fisher & Mustard, 2007).

Existen varios métodos de ajuste pero los más utilizados para suavizar series temporales obtenidas mediante satélite son (Atkinson et al., 2012): filtro de mediana, media móvil, función logística (Zhang et al., 2003), doble función logística para modelar el ciclo completo del cultivo (Fisher et al., 2006; Fisher & Mustard, 2007; Wu et al., 2014), la función Gaussiana asimétrica, el filtro de Savitzky-Golay (De Castro et al., 2014), el análisis de Fourier (Lunetta et al., 2006; Bradley et al., 2007) y el análisis Wavelet (Sakamoto et al., 2005; Galford et al., 2008).

En este trabajo se utilizó el **análisis de Fourier** para suavizar las series temporales. Una serie de Fourier es una serie infinita que converge puntualmente a una función

continua y periódica (Parra, 2015a). La fórmula del polinomio de Fourier es la siguiente (Parra, 2016):

$$\frac{a}{2} + \sum_{j=1}^k (u_j \cos(jw_0t)) + v_j \sin(jw_0t) \quad (2)$$

Donde k es el número de ciclos teóricos o armónicos que consideramos, siendo el máximo $T/2$. T es el número de observaciones. $w_0 = 2\pi/T$ es la frecuencia fundamental (frecuencia angular fundamental). t toma los valores enteros comprendidos entre 1 y T . u_j y v_j son los coeficientes de Fourier.

El **análisis de Fourier** descompone la serie temporal en series sinusoidales de diferentes frecuencias (armónicos). La integración de estas ondas sinusoidales y sus armónicos, derivará en la curva suavizada de la serie temporal (Atkinson et al., 2012; Parra, 2015a). Para ello en *R* se utilizaron los paquetes *descomponer* y *fda*.

Mediante el paquete *descomponer* se obtuvo el *periodograma*, que recogía la contribución que tiene cada armónico en la varianza de cada serie (cada armónico se caracteriza por la frecuencia en que tienen lugar los ciclos). De este modo, los ciclos que tenían un periodo elevado mostraban una baja frecuencia y viceversa (Parra, 2015a). Por lo que el *periodograma* permitió estimar el número de armónicos de la serie temporal. En este trabajo se observó que la mayoría de usos del suelo referentes a cubiertas vegetales presentaban dos armónicos, en consecuencia y para una mayor automatización del proceso, se estableció un valor de dos armónicos para todas las muestras de este trabajo.

Con el paquete *fda* se calculó la transformada de Fourier para suavizar la serie temporal. Las funciones utilizadas fueron: “*create.fourier.basis*” que permite calcular los armónicos de la serie y “*smooth.basis*”, que suaviza la serie de datos. En la Figura 11 se muestra la serie original de una muestra y su correspondiente serie suavizada mediante *fda*:

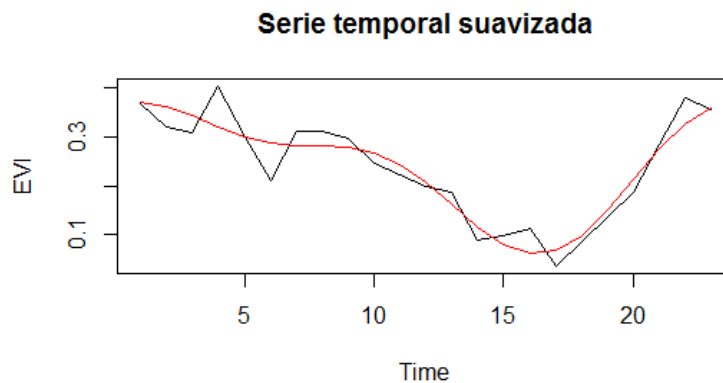


Figura 11. Ajuste de Fourier (curva roja) a serie temporal de la muestra id_35.
El tiempo representa el número de observación de la serie temporal.

Una vez suavizada la serie, mediante un código desarrollado en *R*, se obtuvieron los siete parámetros de interés para el estudio (ver página 24).

Por último, se calculó la distancia de **Jeffries-Matusita** (JM) (Swain & King, 1973) para cuantificar la discrepancia o separabilidad estadística de cada par de clases de uso del suelo en cada uno de los ocho parámetros estudiados (Brown et al., 2013; Wardlow et al., 2007). La distancia JM (ec. 3) evalúa el grado de solape entre las distribuciones de probabilidad de dos clases.

$$J_{ij} = \left\{ \int \left[\sqrt{p(x|\omega_i)} - \sqrt{p(x|\omega_j)} \right]^2 dx \right\} \quad (3)$$

Donde J_{ij} es la distancia de JM entre los pares de clases ω_i y ω_j , x es el parámetro observado y $p(x|\omega_i)$ y $p(x|\omega_j)$ son los condicionales de la probabilidad de la función de densidad para un determinado x , ω_i y ω_j respectivamente.

Valores elevados de distancia corresponden con clases con una mayor diferencia, lo que favorecerá su distinción. Su rango de valores oscila entre 0 y 2, correspondiendo un valor de 0 a dos clases que se solapan totalmente, valores inferiores a 1 a separabilidades bajas, valores entre 1 y 1,5 a separabilidades intermedias, valores entre 1,5 y 2 a separabilidades altas y valores de 2 a separabilidad completa (dos clases entre las que no existe solape) (Skriver, 2007; Larrañaga & Álvarez-Mozos, 2016).

Para realizar el cálculo de esta distancia, se ha utilizado una función cuyo código en R fue facilitado por el tutor del trabajo, que está basado en una función creada por Nikos Alexandris.

En la Figura 12, están representados de manera esquemática los pasos metodológicos descritos anteriormente:

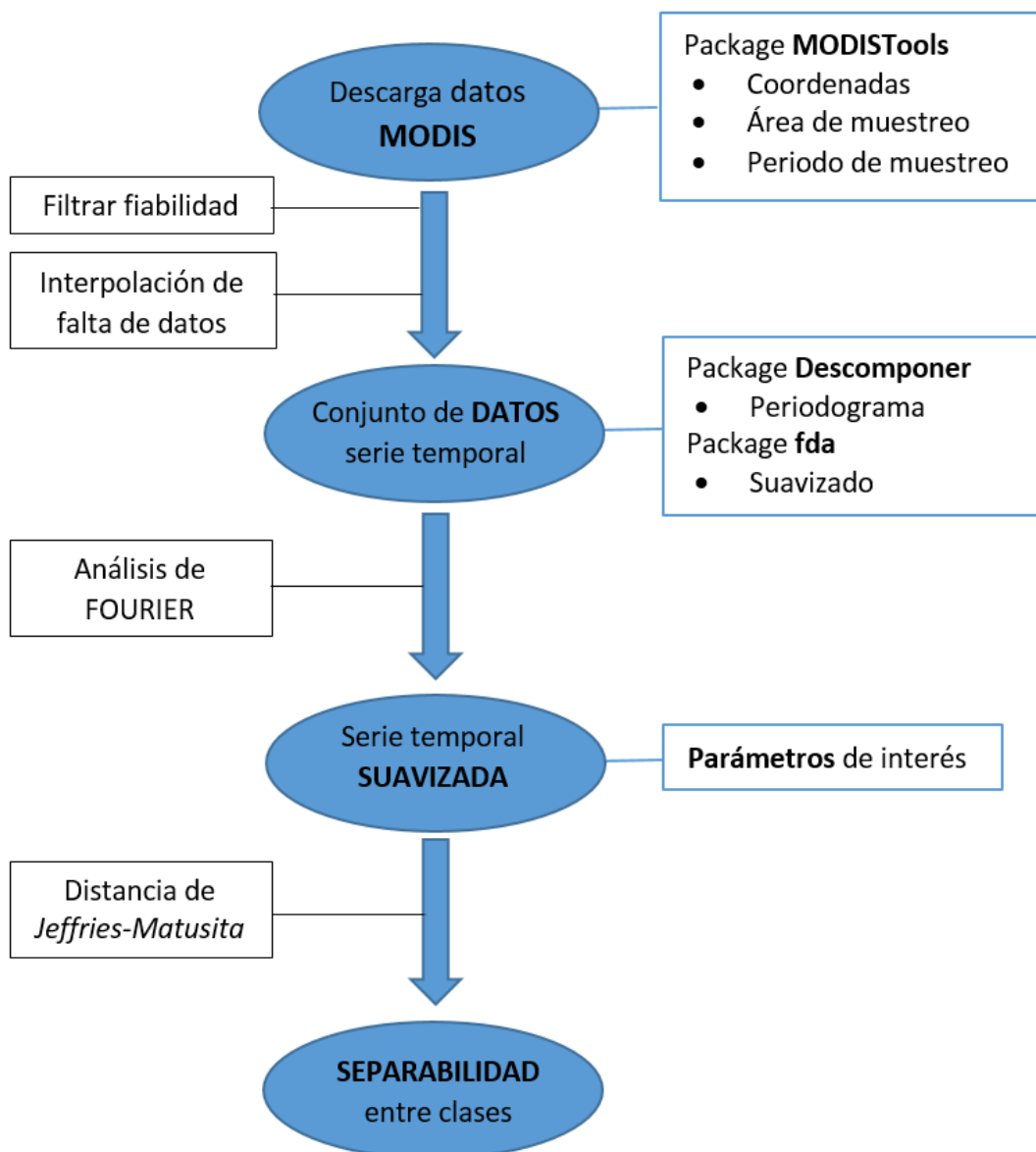


Figura 12. Diagrama de flujo de la metodología seguida.

3 Resultados y Discusión

En este apartado se describen los resultados obtenidos en el presente trabajo. Para la interpretación de los resultados el autor ha asumido ciertas **hipótesis de partida**, ya que, con la información disponible hay cuestiones que no se pueden especificar con mayor detalle. Es por ello, que se asume que:

- Cada uso estudiado presenta un ciclo anual que se describe mediante la serie temporal media calculada para cada uso. Es decir, las cubiertas se analizarán desde una perspectiva anual y cíclica.
- La caña de azúcar es un cultivo semi-perenne, ya que, desde que se plantan los esquejes hasta la primera cosecha el periodo de crecimiento es de 12 (anual) o 18 (año y medio) meses. Las siguientes cosechas son anuales y se llevan a cabo en un periodo de cinco a siete años, hasta que la planta deja de ser económicamente rentable y se reemplaza por una nueva plantación (Rudorff et al., 2010). En este trabajo se asumirá que el ciclo obtenido para la caña es anual, esto es, el periodo entre cosecha y cosecha.
- Las cubiertas de agua y área artificial teóricamente no deben presentar un ciclo anual como las cubiertas vegetales, pero para realizar la comparación entre usos se hablará también de ciclos en estos casos.
- El máximo valor de EVI y el día en que se produce, se asociará con la etapa de madurez o de máxima actividad de la vegetación. Mientras que el mínimo valor de EVI y el día en que se produce, se relacionará a la etapa de dormancia o mínima actividad vegetativa. Se considerará que estas etapas están presentes en las cubiertas vegetales.

En la Tabla 5 se especifican las fechas de observación MODIS que se producen en cada mes para el año 2010. En total son 23 fechas que es el número de observaciones anuales de las que se dispone.

Tabla 5. Días de observación para cada mes.

Mes	Días de observación	Mes	Días de observación
Enero	1, 17	Julio	193, 209
Febrero	33, 49	Agosto	225, 241
Marzo	65, 81	Septiembre	257, 273
Abril	97, 113	Octubre	289
Mayo	129, 145	Noviembre	305, 321
Junio	161, 177	Diciembre	337, 353

3.1 Series temporales medias

En las siguientes figuras se muestran las series temporales y curvas suavizadas obtenidas para cada uso del suelo analizado. Citar que los rangos en los ejes de las ordenadas no son los mismos en todos los gráficos. Se ha decidido hacerlo de este modo para una mejor representación gráfica. Caso de que las series temporales se representaran con el mismo límite en el eje de las ordenadas, las variaciones de algunos de los usos, caso del área artificial y agua continental, serían inapreciables.

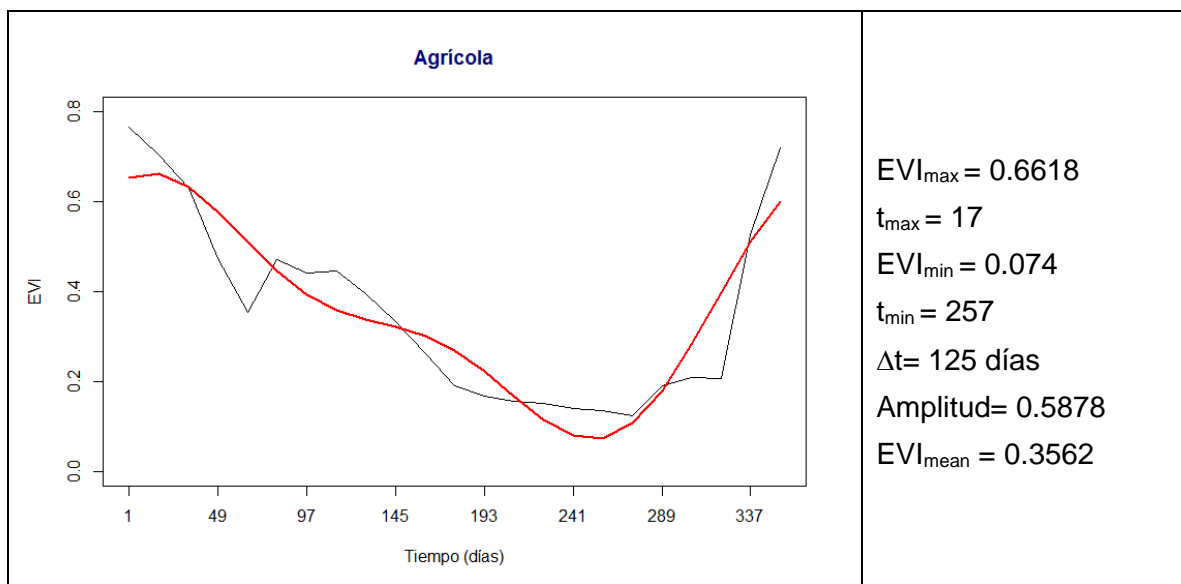


Figura 13. Serie temporal (en negro), curva suavizada mediante el análisis de Fourier (en rojo) y los parámetros medios (mediana) obtenidos para la clase agrícola.

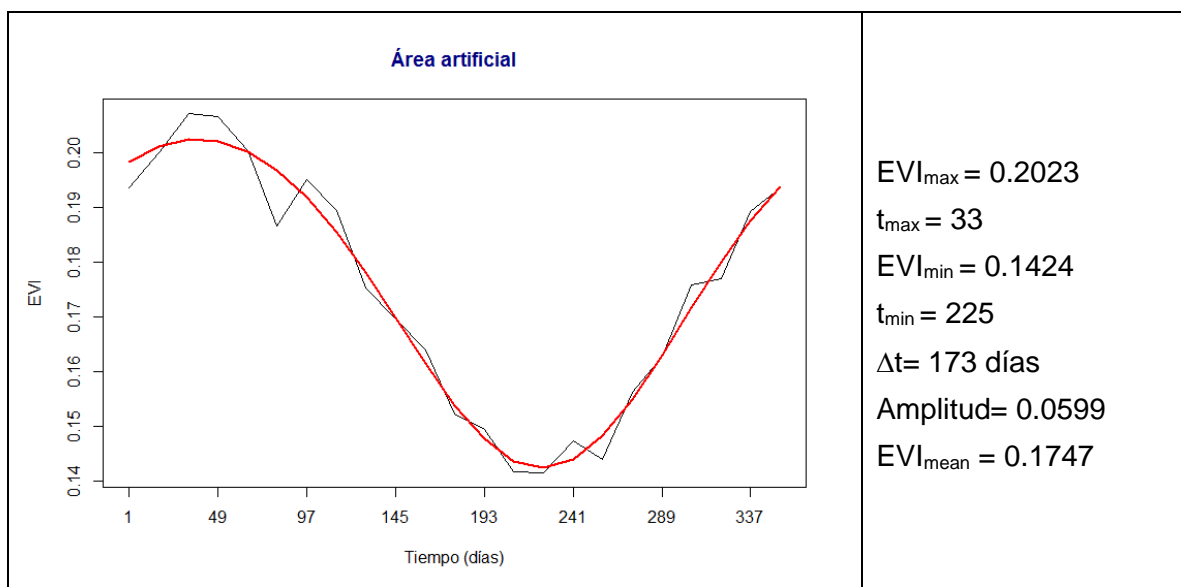


Figura 14. Serie temporal (en negro), curva suavizada mediante el análisis de Fourier (en rojo) y los parámetros medios (mediana) obtenidos para la clase artificial.

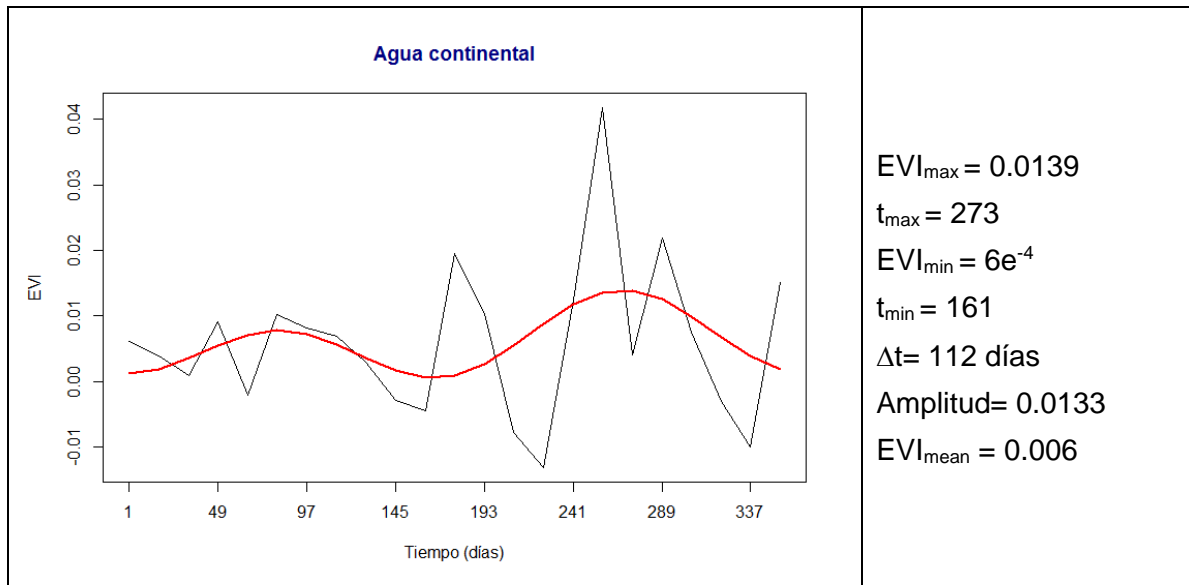


Figura 15. Serie temporal (en negro), curva suavizada mediante el análisis de Fourier (en rojo) y los parámetros medios (mediana) obtenidos para la clase agua.

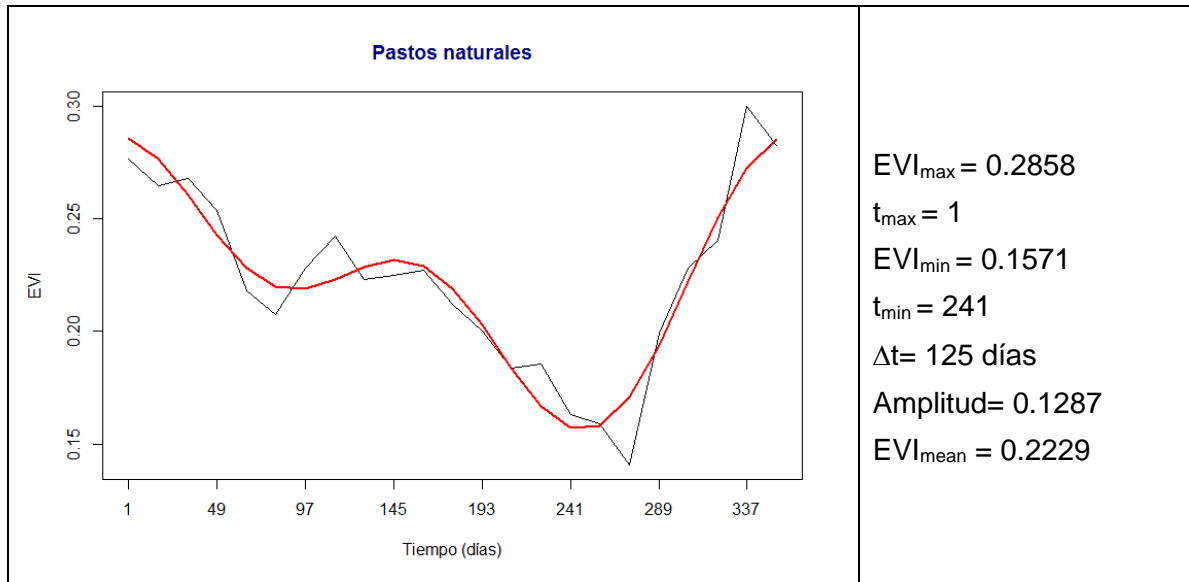


Figura 16. Serie temporal (en negro), curva suavizada mediante el análisis de Fourier (en rojo) y los parámetros medios (mediana) obtenidos para la clase patos naturales.

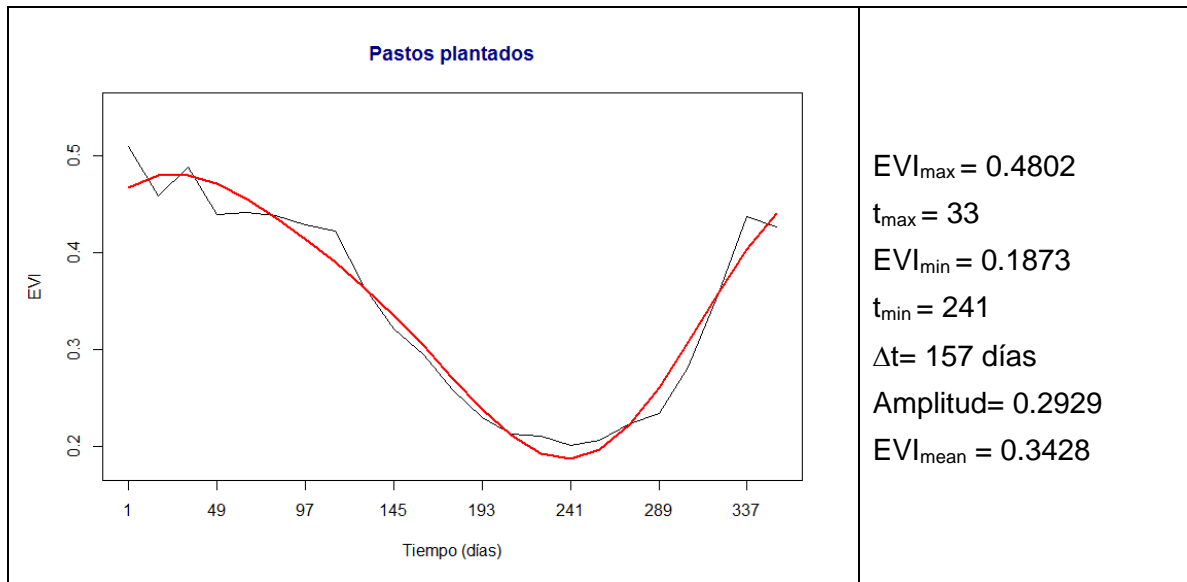


Figura 17. Serie temporal (en negro), curva suavizada mediante el análisis de Fourier (en rojo) y los parámetros medios (mediana) obtenidos para la clase pastos plantados.

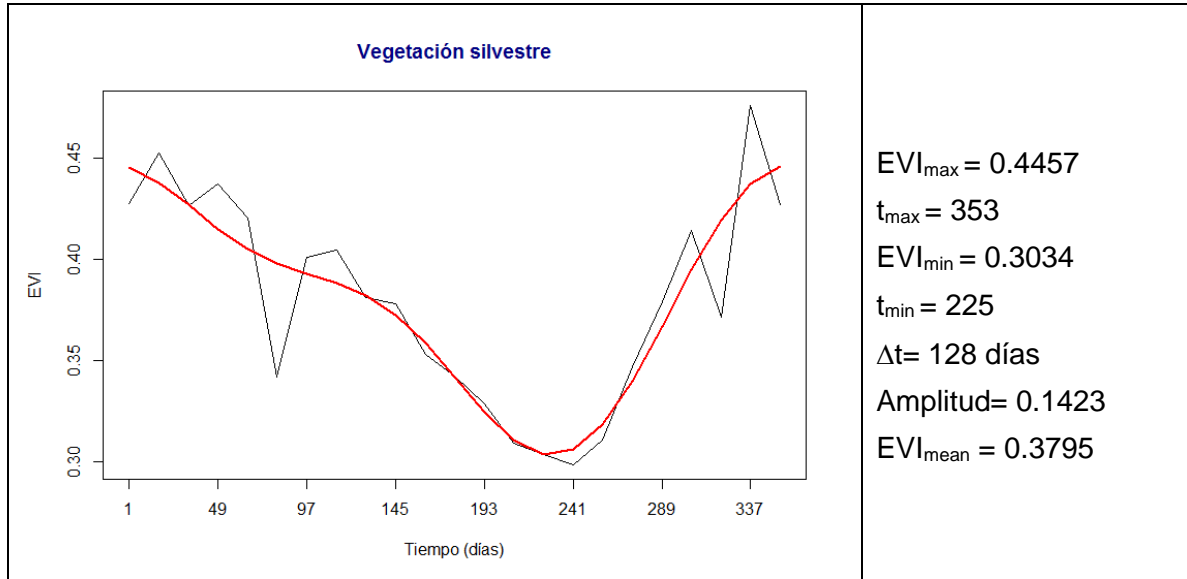


Figura 18. Serie temporal (en negro), curva suavizada mediante el análisis de Fourier (en rojo) y los parámetros medios (mediana) obtenidos para la clase vegetación silvestre.

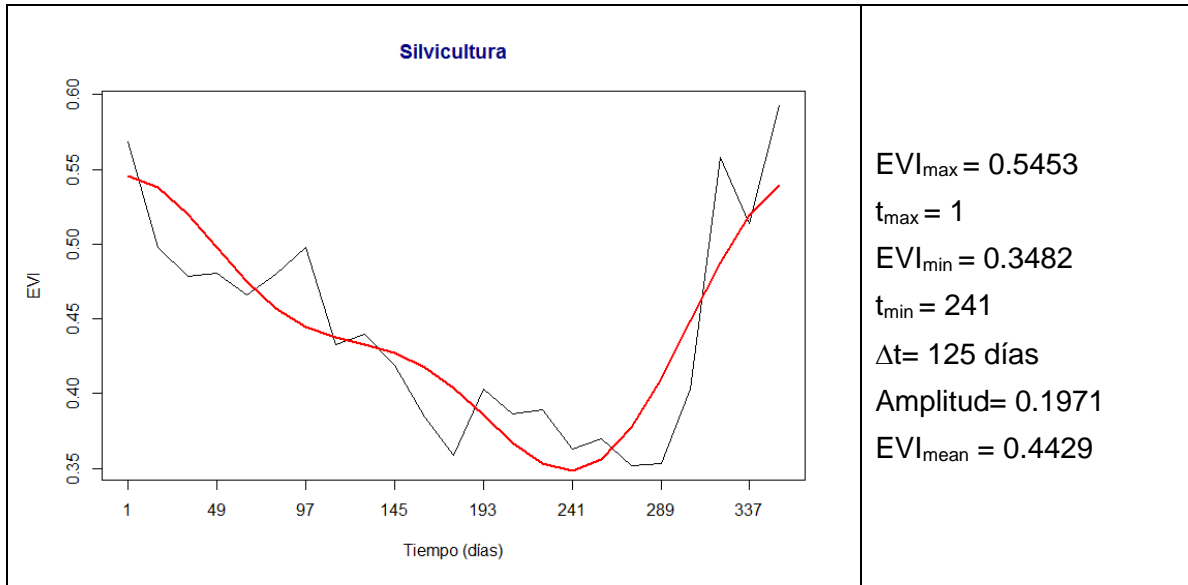


Figura 19. Serie temporal (en negro), curva suavizada mediante el análisis de Fourier (en rojo) y los parámetros medios (mediana) obtenidos para la clase silvicultura.

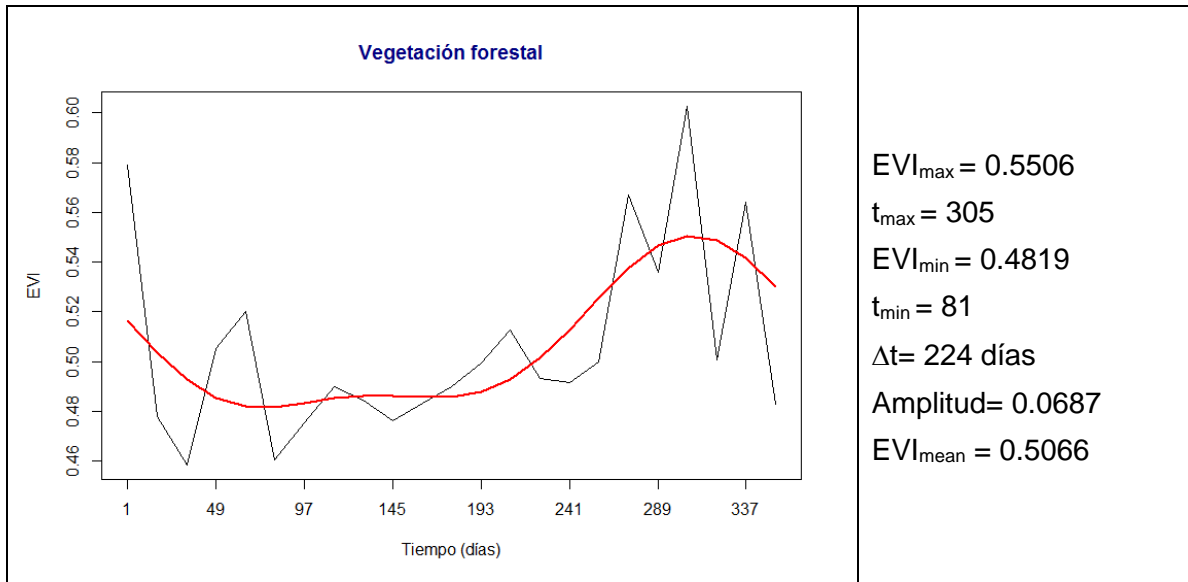


Figura 20. Serie temporal (en negro), curva suavizada mediante el análisis de Fourier (en rojo) y los parámetros medios (mediana) obtenidos para la clase vegetación forestal.

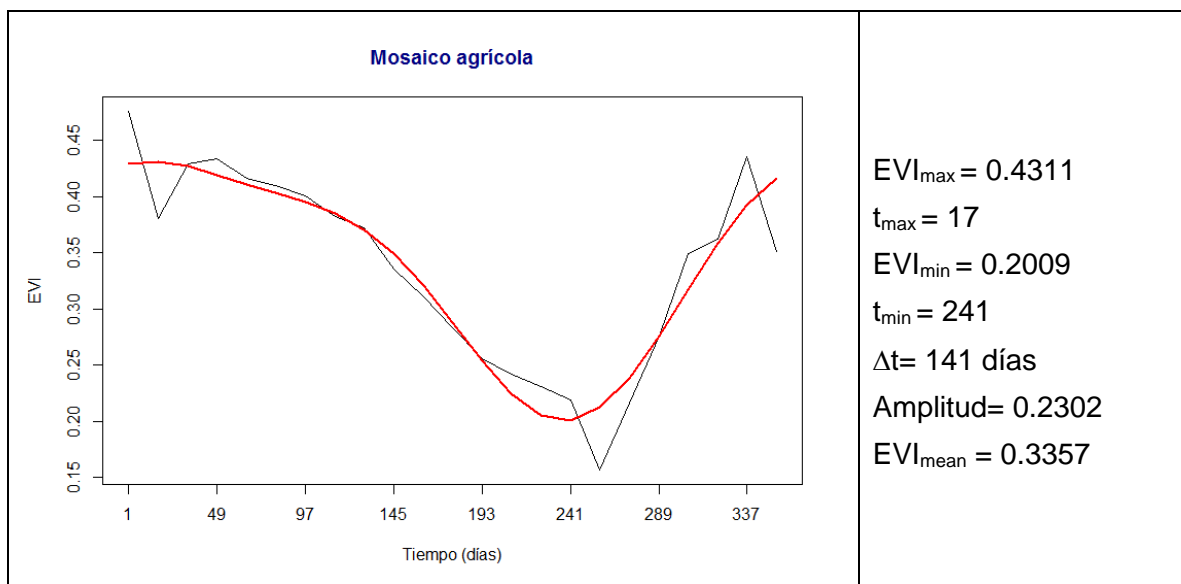


Figura 21. Serie temporal (en negro), curva suavizada mediante el análisis de Fourier (en rojo) y los parámetros medios (mediana) obtenidos para la clase mosaico agrícola.

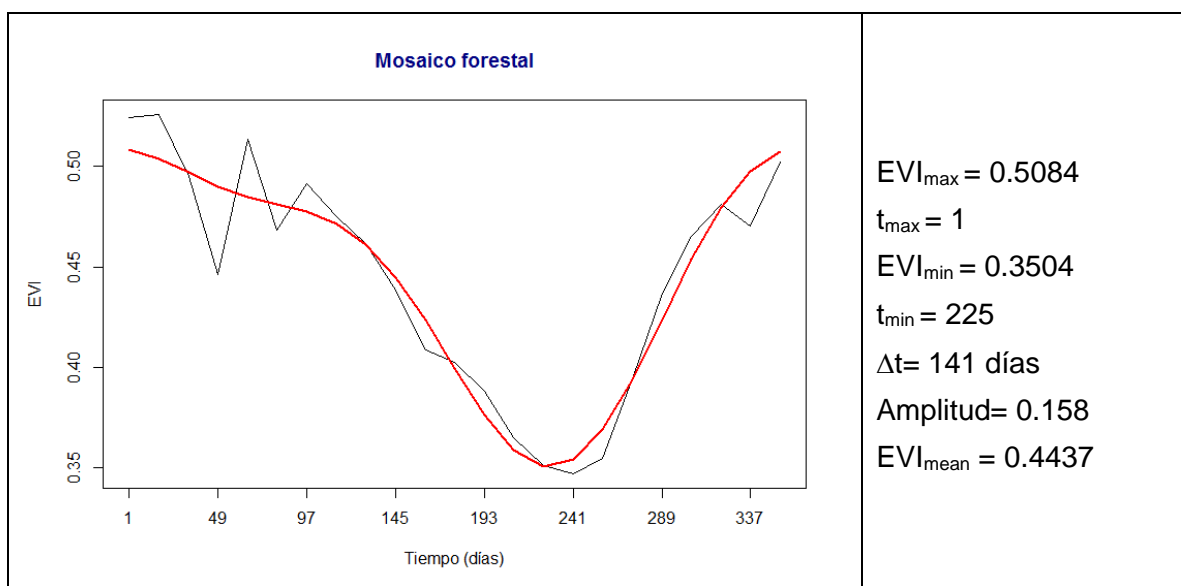


Figura 22. Serie temporal (en negro), curva suavizada mediante el análisis de Fourier (en rojo) y los parámetros medios (mediana) obtenidos para la clase mosaico forestal.

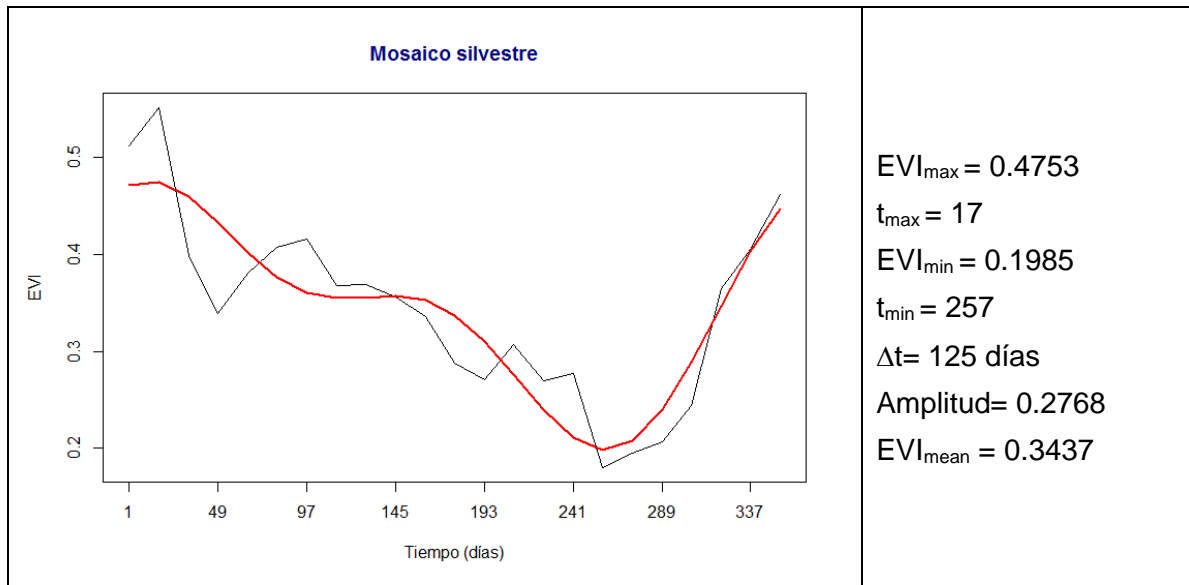


Figura 23. Serie temporal (en negro), curva suavizada mediante el análisis de Fourier (en rojo) y los parámetros medios (mediana) obtenidos para la clase mosaico silvestre.

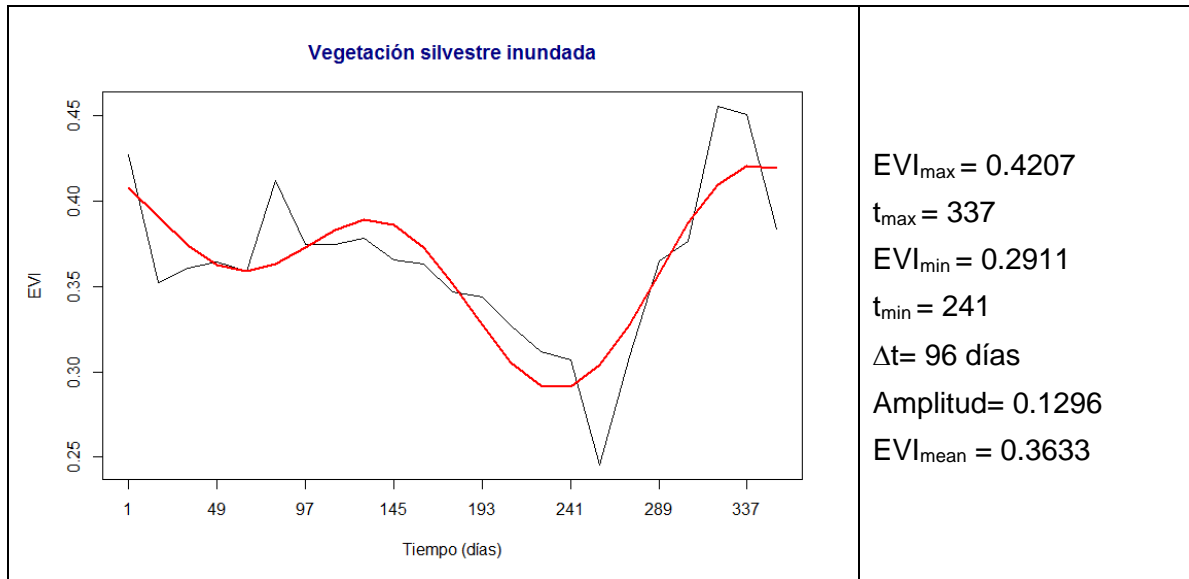


Figura 24. Serie temporal (en negro), curva suavizada mediante el análisis de Fourier (en rojo) y los parámetros medios (mediana) obtenidos para la clase vegetación silvestre inundada.

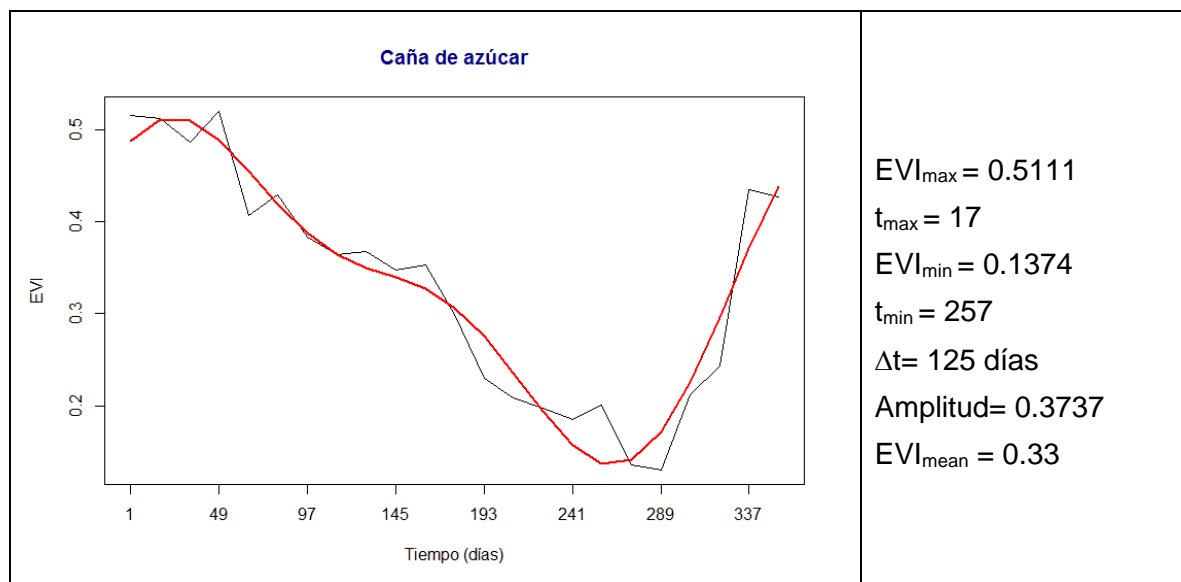


Figura 25. Serie temporal (en negro), curva suavizada mediante el análisis de Fourier (en rojo) y los parámetros medios (mediana) obtenidos para la clase caña de azúcar.

Como era de esperar, los usos de área artificial y agua continental presentan claras diferencias respecto a las cubiertas vegetales. Así, la diferencia entre el máximo y mínimo (de aquí en adelante amplitud) respecto a los demás usos es baja, siendo de 0.0599 para el área artificial y de 0.0133 para el agua, por lo que, se puede afirmar que el valor de EVI se mantiene en una tendencia constante en estos casos, al contrario que las cubiertas vegetales donde presentan un ciclo con ciertas diferencias de amplitud. A su vez, el área artificial y agua continental presentan los valores de EVI medios más bajos 0.1747 y 0.006 respectivamente.

Respecto a los demás usos, se observa como la etapa de madurez asociada a la máxima actividad vegetativa se produce mayoritariamente en enero, si bien para los pastos plantados se produce a principios de febrero y en el caso de la vegetación silvestre y la vegetación silvestre inundada se produce a finales de diciembre. Para el caso de la etapa de dormancia, por lo general ésta se produce en el mes de agosto y en algunos casos en septiembre.

Destacar el caso de la vegetación forestal, donde la etapa de madurez ocurre en noviembre y la mínima actividad se produce en marzo. Además los valores máximo y mínimo de EVI no difieren mucho entre sí. Esto puede ser debido a que las especies presentes en este uso sean perennes, y por tanto, la variación del área foliar y actividad vegetativa sean pequeñas (Wu et al., 2014).

Analizando el parámetro de amplitud, se observa cómo los valores más elevados se encuentran en aquellos usos donde por lo general ha habido actividad antrópica. De este modo, con un 0.5878 el uso agrícola presenta la mayor diferencia entre el valor de EVI máximo y EVI mínimo. En el caso de la caña, esta diferencia es menor 0.3737, pero sigue siendo más elevada respecto a las demás cubiertas.

El valor máximo de EVI es de 0.6618 y está registrado en el uso agrícola y el mínimo máximo EVI registrado, para las cubiertas consideradas vegetales, es de 0.2858 para los pastos naturales. En el caso del valor mínimo de EVI, éste se produce para el uso agrícola 0.074 y el máximo mínimo con valor de 0.4819 está relacionado con el uso de vegetación forestal. Observando los valores de EVI medio, el mayor valor 0.5066 se obtiene para el uso forestal. Por el contrario el valor más bajo, dentro de las cubiertas consideradas como vegetales, con un valor de 0.2229 se produce en los pastos naturales.

Finalmente, analizando el tiempo de subida, es decir, los días que transcurren desde el comienzo de la actividad vegetativa hasta alcanzar la etapa de madurez, este es menor que el tiempo de bajada para todos los usos, exceptuando el caso de la vegetación forestal donde es de 224 días. El menor tiempo de subida se produce para la vegetación silvestre inundada (96 días), esto puede estar relacionado con el periodo en que la vegetación se encuentra anegada de agua. Examinando los usos sobre los que se ejerce una gestión antrópica, este tiempo por lo general es menor respecto a los demás usos. Así, con un tiempo de subida de 125 días se encuentran el uso agrícola, silvicultura y caña de azúcar. Los pastos plantados con 157 días muestran un mayor tiempo de subida que la mayoría de usos.

3.2 Separabilidad de clases

La información obtenida en el anterior apartado, describe de manera cualitativa el comportamiento general de los diferentes usos a partir de los parámetros medios contemplados. A continuación se presentan de forma cualitativa y cuantitativa, qué parámetros de los estudiados son los más adecuados para separar dos usos entre sí.

En los siguientes diagramas de cajas (*Box plot*) se muestra la variabilidad recogida para cada clase respecto a los parámetros estudiados. Estos gráficos nos permitirán hacer un análisis previo de la idoneidad de los parámetros para la separación de usos (clases), ya que, cuanto menos se solapen las cajas más útil será el parámetro para discriminar los usos del suelo.

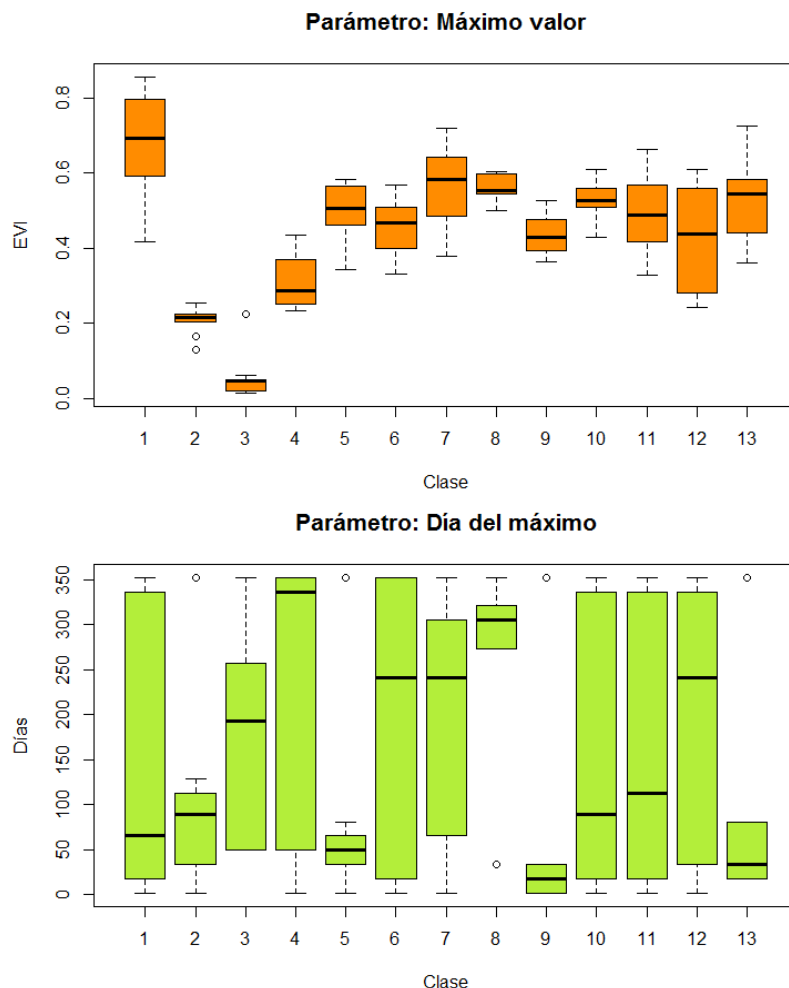


Figura 26. Diagrama de cajas para el máximo valor de EVI y día en que se produce por clase.

El valor máximo puede permitir discriminar las clases artificial (2) y agua (3) del resto de clases. Estas clases muestran valores más bajos, debido a que, no son cubiertas vegetales. Las clases agrícola (1) y pastos naturales (4) a priori también parecen poder discriminarse de algunas de las clases.

Respecto al día en que se produce el EVI máximo, se observa cómo en algunas clases este es muy variable, es el caso de la clase agrícola (1), pastos naturales (4), vegetación silvestre (6), silvicultura (7), mosaico forestal (10), mosaico silvestre (11) y la vegetación silvestre inundada (12). Algunos autores (Bradley et al., 2007; Fisher et al., 2006; Fisher & Mustard, 2007; Wardlow et al., 2007; Xue et al., 2013) afirman que esta variabilidad puede ser causada por los diferentes microclimas existentes debidos a diferencias en latitud, longitud y altitud. Esto es más visible en grandes extensiones, como puede ser el caso de las muestras utilizadas en el presente trabajo.

En cambio, en los casos de pastos plantados (5), vegetación forestal (8), mosaico agrícola (9) y caña de azúcar (13) el EVI máximo se suele producir en un rango bajo de días. Para estos casos el uso forestal (8), difiere de la clase área artificial (2), pastos plantados (5), mosaico agrícola (9) y caña de azúcar (13). Es de suma importancia contemplar y evaluar estas posibles variaciones, puesto que condicionarán el modo de caracterizar los diferentes usos en grandes superficies.

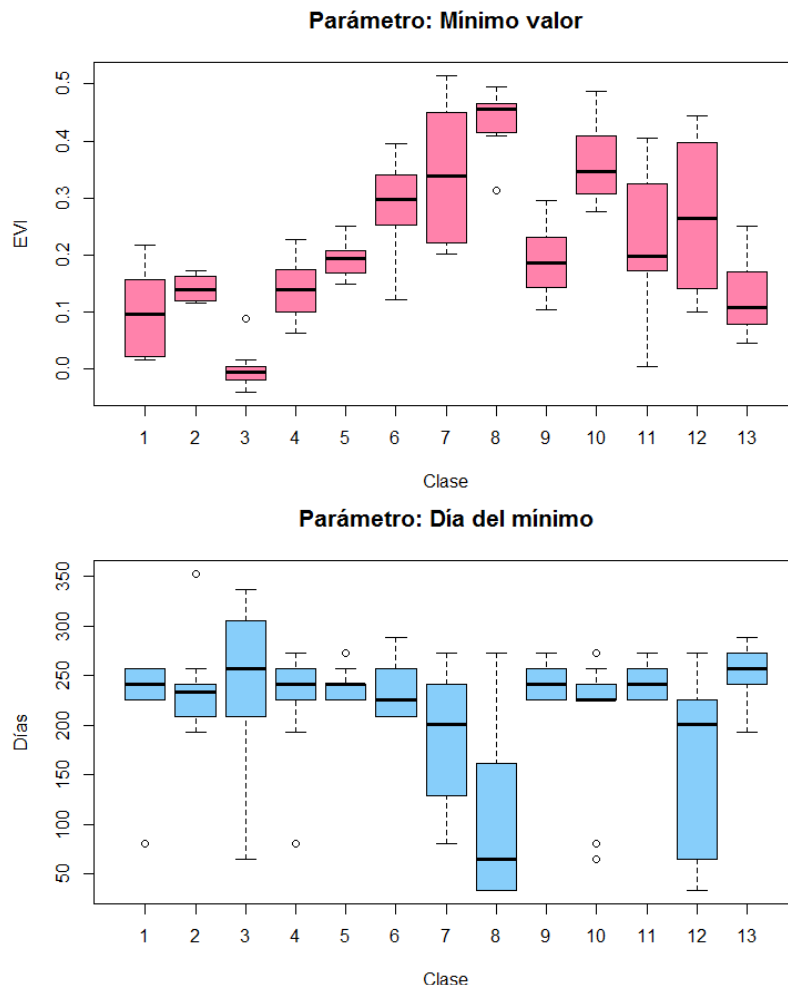


Figura 27. Diagrama de cajas para el mínimo valor de EVI y día en que se produce por clase.

El valor mínimo de EVI parece ser útil para discriminar el agua (3) del resto de clases. También parece que puede servir para discriminar el grupo formado por la clase agrícola (1), artificial (2), pastos naturales (4) y caña de azúcar (13) del resto de clases. Sin embargo, el día en que se producen estos mínimos parece que no es adecuado para la discriminación de estas trece clases, dado que el rango de ocurrencia es bastante

similar entre las clases. Comparando este parámetro con el día en que se produce el EVI máximo, en este caso no hay tanta variabilidad, exceptuando en los casos de silvicultura (7), vegetación forestal (8) y la vegetación silvestre inundada (12)

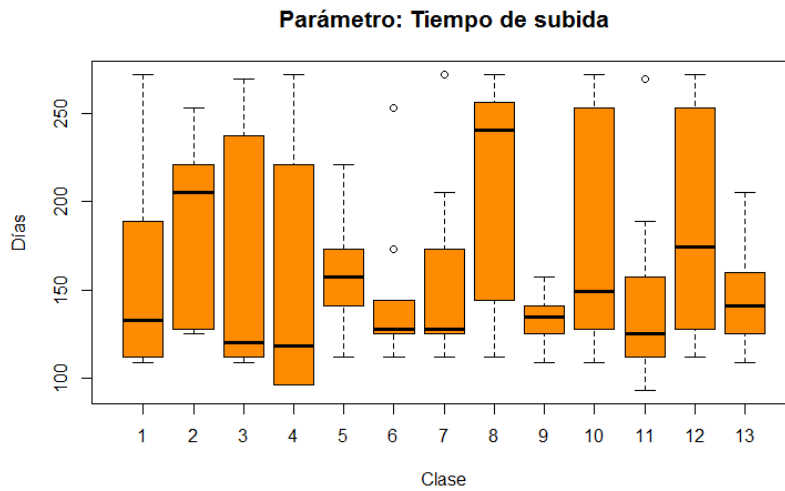


Figura 28. Diagrama de cajas para el tiempo de subida por clase.

El tiempo de subida parece no ser un parámetro adecuado para la discriminación de las clases, puesto que todas se solapan en algún punto. Además, como ocurre en el caso del parámetro del día máximo, en alguna de las clases presenta gran variabilidad.

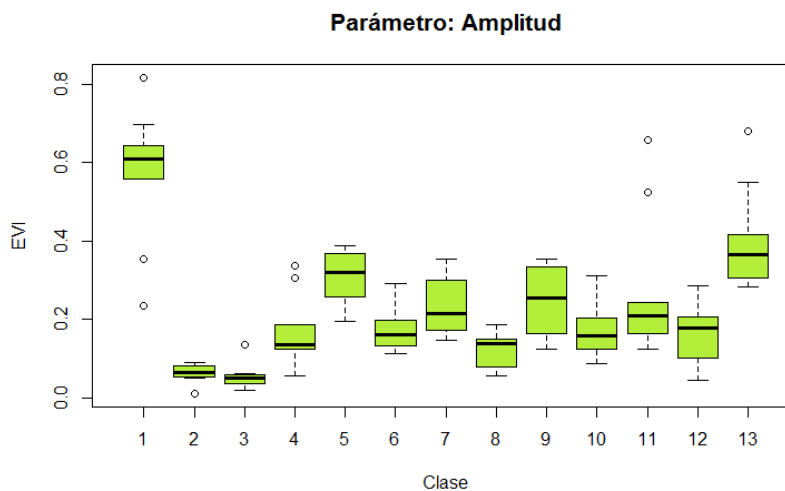


Figura 29. Diagrama de cajas para la amplitud de subida por clase.

Analizando la amplitud, parece ser un buen parámetro para discriminar algunas de las clases, ya que no presenta gran variabilidad y tiende a mantenerse estable en el tiempo (Xue et al., 2013). En este caso, parece que puede ser un parámetro útil para discriminar la clase agrícola (1), las clases artificial (2) y agua (3) y la caña (13) entre otras.

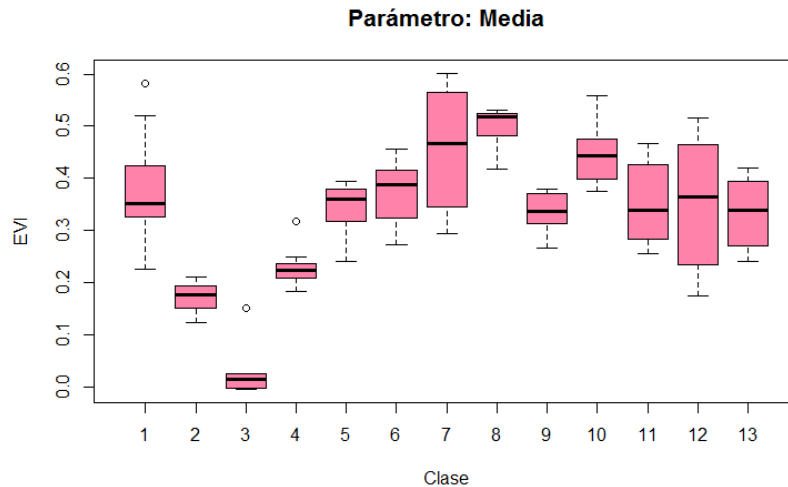


Figura 30. Diagrama de cajas para EVI medio por clase.

Por último, el parámetro de EVI medio puede ser útil para discriminar algunas de las clases entre sí. No es un parámetro que muestre gran variabilidad, por lo que puede ser característico de cada clase.

En los anteriores diagramas, se han descrito de forma visual la idoneidad de los parámetros estudiados para su uso como criterio para separar los diferentes usos entre sí, pero para poder cuantificar la capacidad de discriminación, se ha calculado la distancia de *Jeffries-Matusita* (JM). Recordar que la distancia JM se calcula para cada par de clases y toma un rango de valores entre 0 y 2, siendo de 0-1 clases de baja separabilidad, valores entre 1-1.5 indican separabilidad intermedia y valores entre 1.5-2 indican una alta separabilidad entre clases.

En la siguiente Tabla 6, se muestran de manera resumida el máximo valor de JM obtenido, así como el parámetro con que se obtiene. Las tablas con todos los valores de las distancias de JM se adjuntan en el Anexo 3.

Tabla 6. Máximas distancias de *Jeffries-Matusita* y parámetro con el que se obtiene.
Donde EVI_{max} = Máximo, t_{max} = Día máximo, EVI_{min} = Mínimo, t_{min} = Día mínimo, Δt = T subida,
EVI_{mean} = Media.

CLASE	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1,892 Amplitud	1,956 Máximo	1,496 Máximo	1,018 Amplitud	1,067 Mínimo	1,303 Amplitud	1,961 Mínimo	1,131 Amplitud	1,531 Amplitud	0,65 Amplitud	1,539 Amplitud	0,355 Amplitud
2		1,904 Mínimo	0,946 Amplitud	1,903 Amplitud	1,847 Media	1,895 Máximo	2 Máximo, media	1,929 Media	1,997 Máximo	1,634 Máximo	1,238 Máximo	1,788 Amplitud
3			1,895 Media	1,987 Media	1,992 Media	1,979 Máximo	2 Max, min, media	1,998 Media	2 Máximo, media	1,934 Media	1,624 Media	1,949 Media
4			1,155 Máximo	1,155 Máximo	1,351 Media	1,384 Máximo	1,999 Media	1,315 Media	1,878 Media	0,978 Media	0,829 Media	1,071 Máximo
5					0,879 Amplitud	1,049 Mínimo	1,974 Mínimo	0,513 T subida	1,502 Mínimo	0,682 Mínimo	1,018 Día mínimo	0,563 Mínimo
6						0,596 Día mínimo	1,245 Media	0,459 Mínimo	0,418 Día mínimo	0,573 Amplitud	0,657 Día mínimo	1,122 Amplitud
7							0,758 Amplitud	0,836 Día mínimo	0,292 Máximo	0,774 Día mínimo	0,333 Máximo	0,953 Mínimo
8								1,874 Media	0,404 Mínimo	1,334 Día mínimo	0,952 Media	1,478 Amplitud
9									1,187 Mínimo	0,56 T subida	0,965 Día mínimo	0,475 Amplitud
10										0,668 Día mínimo	0,558 Máximo	1,497 Mínimo
11											0,906 Día mínimo	0,339 Mínimo
12												1,077 Amplitud

Legenda

Color

- Alta
- Intermedia
- Baja

En la Tabla 6 se aprecia cómo en algunos casos la mayor distancia de JM es menor al valor de 1, por lo que la separabilidad entre estas clases es baja. En otros casos la separabilidad entre algunas clases es total, puesto que el valor de JM es 2. También hay casos con una separabilidad intermedia entre estas dos categorías.

Respecto a los parámetros que permiten una alta separabilidad entre clases, se observa cómo el EVI medio es el más adecuado (máximo valor de JM) para separar quince pares de clases. El parámetro máximo permite separar ocho clases, mientras que el mínimo y la amplitud permiten diferenciar cada uno cinco clases. Los parámetros de día máximo, día mínimo y tiempo de subida no permiten separar, desde la perspectiva de máxima distancia de JM, ninguna clase entre sí.

En la siguiente tabla se muestra la categorización de la separabilidad entre clases respecto a cada una de las clases estudiadas.

Tabla 7. Resumen de la separabilidad para cada clase.

Clase	Alta separabilidad	Separabilidad intermedia	Baja separabilidad
1	2, 3, 8, 10, 12	4, 5, 6, 7, 9	11, 13
2	1, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13	12	4
3	Todas	-	-
4	3, 8, 10	1, 5, 6, 7, 9, 13	2, 11, 12
5	2, 3, 8, 10	1, 4, 7, 12	6, 9, 11, 13
6	2, 3	1, 4, 8, 13	5, 7, 9, 10, 11, 12
7	2, 3	1, 4, 5	6, 8, 9, 10, 11, 12, 13
8	1, 2, 3, 4, 5, 9	6, 11, 13	7, 10, 12
9	2, 3, 8	1, 4, 10	5, 6, 7, 11, 12, 13
10	1, 2, 3, 4, 5	9, 13	6, 7, 8, 11, 12
11	2, 3	8	1, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 12, 13
12	1, 3	2, 5, 13	4, 6, 7, 8, 9, 10, 11
13	2, 3	4, 6, 8, 10, 12	1, 5, 7, 9, 11

De la tabla se puede deducir, que el agua (3) es la clase con mayor separabilidad, ya que, presenta una alta separabilidad con el resto de clases. La clase área artificial (2) también tiene un alto grado de separabilidad, exceptuando con los pastos naturales (4) donde esta es baja. Por otro lado, los usos como el agrícola (1), vegetación forestal (8) y el mosaico forestal (10), muestran unos buenos rangos de separabilidad.

En caso de contemplar de manera conjunta las categorías de alta separabilidad y separabilidad intermedia, los usos como los pastos naturales (5) y la caña de azúcar (13) ofrecen buenos resultados de separabilidad.

Analizando la caña de azúcar, se observa que es altamente separable con las clases 2 y 3, presentando separabilidad intermedia respecto a los pastos naturales (4), vegetación silvestre (6), vegetación forestal (8), mosaico forestal (10) y la vegetación silvestre inundada (12). Por otro lado, muestra baja separabilidad respecto a los usos donde hay actividad antrópica, como son la clase agrícola (1), los pastos plantados (5), silvicultura (7), mosaico agrícola (9) y mosaico de vegetación silvestre (11), si bien en esta última clase la actividad antrópica es menor.

Examinando los resultados, parece posible detectar los cambios de usos no permitidos del cultivo de caña de azúcar, ya que, como algunos autores concluyen, en los últimos años la expansión de la caña de azúcar se ha dado en más del 99% de los casos sobre los usos de pastos o usos agrícolas (Adami et al., 2012). Estos cambios son detectables,

puesto que el cambio de pasto a caña esta categorizado como separación intermedia y aunque el cambio de uso agrícola a caña de azúcar con los estudios realizados no es detectable, este cambio está permitido legalmente.

Por otro lado, hay autores que afirman que en ciertas ocasiones antes de establecer el cultivo de caña, hay una conversión previa de pastos a área agrícola (Rudorff et al., 2010), por lo que aparentemente el cultivo de caña estaría legalmente permitido, no siendo así, ya que el uso del suelo previo a detectar no sería el agrícola sino el uso de pasto. En este caso también es detectable el cambio, puesto que, aunque el cambio de agrícola a caña no es detectable, esa superficie debería estar previamente catalogada como cambio no permitido, dado que el cambio de pasto a agrícola es altamente separable y por lo tanto detectable.

Debida a la distribución de los diferentes usos, las áreas con vegetación forestal o de vegetación silvestre pueden ser susceptibles de remplazo por el cultivo de caña de azúcar. Los resultados muestran que estos cambios también pueden ser detectables en ambos casos, ya que la separabilidad entre cada una de estas clases con la caña de azúcar es intermedia.

Por último, en los casos que la caña no es separable, ya existe un rendimiento económico sobre esas clases, por lo que, a priori, no son potencialmente susceptibles de sufrir cambios de uso y en caso de que se llevara a cabo el cambio, habría que estudiarlo, ya que este podría estar en la clase de los cambios permitidos.

A la vista de los resultados obtenidos, la valoración de la metodología diseñada es positiva y como un análisis preliminar, se puede afirmar que la caña de azúcar, objeto de estudio, se puede llegar a separar de otros usos. A su vez, las siguientes fases de la investigación deben ir orientadas a una caracterización detallada de los distintos usos y obtener aquellos parámetros que permitan el desarrollo de un buen clasificador. Una vez completada esta segunda fase, se procederá a validar la metodología planteada, mediante la medición del grado de eficacia (acierto) final, sobre unas áreas donde se tenga conocimiento previo del cambio producido.

4 Conclusiones

La metodología planteada, hasta la fase actual, tiene un alto grado de automatización y puede ser desarrollada mediante herramientas de libre acceso: QGIS, lenguaje *R* y datos MODIS y la precisión de la metodología para caracterizar cada cambio, estará determinada por el grado de conocimiento previo de los usos reales del suelo.

Respecto a la separabilidad, el parámetro con el que se logra en más ocasiones la mayor distancia de JM es el EVI medio. La clase con mejor separabilidad es el agua continental, siendo separable con todas las clases, mientras que el mosaico silvestre es la clase con menor separabilidad. A pesar de la homogenización de diferentes cultivos dentro de la clase agrícola, esta presenta buenos resultados de separabilidad frente a otros usos. En caso de querer discriminar más en detalle los cultivos presentes, se deberá realizar un trabajo de campo que incluya un muestreo in situ. Las clases catalogadas como mosaico agrícola, mosaico forestal y mosaico silvestre no presentan buena separabilidad. En relación al cumplimiento de los criterios de sostenibilidad de cambios de uso de suelo, esto significa que en estas zonas se puedan producir cambios de uso del suelo no detectables.

Los usos con fisiología semejante como pueden ser los pastos naturales y pastos plantados pueden discriminarse entre sí. En cuanto al cumplimiento de los criterios de sostenibilidad de cambios de uso de suelo, esta discriminación posibilita distinguir entre cambios permitidos y no permitidos, realizados en áreas pratenses. Por el contrario, en el uso de silvicultura y vegetación forestal como no se puede realizar una discriminación entre ambos, puede haber incertidumbre a la hora de detectar si el cambio de uso de silvicultura a caña es permitido o no, puesto que existirá dificultad para verificar si el área era silvícola o previamente era vegetación forestal.

Los resultados de separabilidad de la caña de azúcar son buenos y la metodología planteada permite la detección de los cambios de usos de suelo que hasta la fecha son los más usuales: de pastos naturales a caña y de vegetación forestal a caña. Las clases no separables respecto a la caña de azúcar, son clases en las que existe una explotación económica. Por lo que el no detectar estos cambios no debería suponer un inconveniente, ya que estos cambios son infrecuentes y aun produciéndose, podrían estar permitidos según los criterios de sostenibilidad de la Directiva 2009/28/CE.

El objetivo de la metodología es detectar cambios de uso de suelo en grandes extensiones, aunque también se ha establecido una metodología que permite la detección de cambios a nivel de pixel.

En siguientes fases de esta metodología se deberá desarrollar un clasificador y se validará la metodología determinando el error existente en los resultados obtenidos. También sería interesante profundizar en el error asumible para considerar esta metodología válida para el cumplimiento de los criterios de sostenibilidad relacionados con cambios de uso de suelo establecidos en la Directiva 2009/28/CE.

Por último, la metodología planteada, una vez completada, podría servir a los productores de biocombustibles líquidos, sólidos, y de bio-productos como herramienta de verificación de los criterios de sostenibilidad relacionados con cambios de uso de suelo establecidos en la Directiva 2009/28/CE.

5 Bibliografía

- Adami, M., Rudorff, B. F. T., Freitas, R. M., Aguiar, D. A., Sugawara, L. M., & Mello, M. P. (2012). Remote sensing time series to evaluate direct land use change of recent expanded sugarcane crop in Brazil. *Sustainability*, 4, 574-585.
- Atkinson, P. M., Jeganathan, C., Dash, J., & Atzberger, C. (2012). Inter-comparison of four models for smoothing satellite sensor time-series data to estimate vegetation phenology. *Remote Sensing of Environment*, 123, 400–417.
- Bradley, B. A., Jacob, R. W., Hermance, J. F., & Mustard, J. F. (2007). A curve fitting procedure to derive inter-annual phenologies from time series of noisy satellite NDVI data. *Remote Sensing of Environment*, 106(2), 137–145.
- Brown, J. C., Kastens, J. H., Coutinho, A. C., Victoria, D. de C., & Bishop, C. R. (2013). Classifying multiyear agricultural land use data from Mato Grosso using time-series MODIS vegetation index data. *Remote Sensing of Environment*, 130, 39–50.
- Campbell, J. B., & Wynne, R. (2011). *Introduction to Remote Sensing, Fifth Edition*. Guilford Press (667 pp.).
- CENER (2016). CENTRO NACIONAL DE ENERGIAS RENOVABLES. Comunicación personal.
- Chuvienco, E. (2010). *Teledetección Ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio. Nueva Edición Actualizada*. Editorial Planeta, S.A. (590 pp.).
- Clark, M. L., Aide, T. M., Grau, H. R., & Riner, G. (2010). A scalable approach to mapping annual land cover at 250 m using MODIS time series data : A case study in the Dry Chaco ecoregion of South America. *Remote Sensing of Environment*, 114(11), 2816–2832.
- COM/2010/0011 final. REPORT FROM THE COMMISSION TO THE COUNCIL AND THE EUROPEAN PARLIAMENT ON SUSTAINABILITY REQUIREMENTS FOR THE USE OF SOLID AND GASEOUS BIOMASS SOURCES IN ELECTRICITY, HEATING AND COOLING, SEC(2010) 65 final SEC(2010) 66 final.
- COM/2012/060 final. COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS. Innovating for Sustainable Growth: A Bioeconomy for Europe.
- COM/2014/015 final. COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS. A policy framework for climate and energy in the period from 2020 to 2030.
- COM/2015/080 final. COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE, THE COMMITTEE OF THE REGIONS AND THE EUROPEAN INVESTMENT BANK. A Framework Strategy for a Resilient Energy Union with a Forward-Looking Climate Change Policy.
- COM/2015/0614 final. COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS. Closing the loop - An EU action plan for the Circular Economy.
- De Castro, A. I., Plant, R. E., Six, J., & Peña, J. M. (2014). Mapas de calendario de cultivo y variables fenológicas mediante el análisis de imágenes MODIS y ASTER basado en objetos. *Revista de Teledetección*, 41, 29–36.

- Directiva 2009/28/CE. Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de abril de 2009, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables y por la que se modifican y se derogan las Directivas 2001/77/CE y 2003/30/CE (Texto pertinente a efectos del EEE)
- Dong, J., Xiao, X., Sheldon, S., Biradar, C., Duong, N. D., & Hazarika, M. (2012). A comparison of forest cover maps in Mainland Southeast Asia from multiple sources: PALSAR, MERIS, MODIS and FRA. *Remote Sensing of Environment*, 127, 60-73.
- EN 14588:2010. Solid biofuels. Terminology, definitions and descriptions.
- European Union. (2012). Innovating for Sustainable Growth, A Bioeconomy for Europe (64 pp.).
- FAO (2016). FAOSTAT. Disponible en <http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx?PageID=567#ancor> (último acceso 19/09/2016).
- Fisher, J. I., & Mustard, J. F. (2007). Cross-scalar satellite phenology from ground, Landsat, and MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 109(3), 261–273.
- Fisher, J. I., Mustard, J. F., & Valdeboncoeur, M. A. (2006). Green leaf phenology at Landsat resolution: Scaling from the field to the satellite. *Remote Sensing of Environment*, 100, 265–279.
- Galford, G. L., Mustard, J. F., Melillo, J., Gendrin, A., Cerri, C. C., & Cerri, C. E. P. (2008). Wavelet analysis of MODIS time series to detect expansion and intensification of row-crop agriculture in Brazil. *Remote Sensing of Environment*, 112(2), 576–587.
- GFW (2016). Visor de Global Forest Watch, Land Cover 2009. Disponible en <http://gfw-nav.herokuapp.com/map/3/15.00/27.00/ALL/> (último acceso 19/09/2016).
- GSP (2016). Humboldt State University, Introduction to Remote sensing. Disponible en http://gsp.humboldt.edu/olm_2015/Courses/GSP_216_Online/lesson3-1/resolution.html (último acceso 19/09/2016).
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83, 195–213.
- IBGE (2016). Portal de Mapas IBGE. Disponible en <http://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php#homepage> (último acceso 19/09/2016).
- IDAE (2007). *Energía de la biomasa*. Manuales de Energías Renovables (138 pp.).
- IDAE (2011). *Resumen del Plan de Energías Renovables* (64 pp.).
- IEA Bioenergy (2009). *Bioenergy – a Sustainable and Reliable Energy Source* (108 pp.).
- INPE (2016). CANASAT, Sugarcane crop monitoring in Brazil. Disponible en <http://www.dsr.inpe.br/laf/canasat/en/> (último acceso 19/09/2016).
- Justice, C. O., Townshend, J. R. G., Vermote, E. F., Masuoka, E., Wolfe, R. E., Saleous, N., Roy, D.P., & Morisette, J. T. (2002). An overview of MODIS Land data processing and product status. *Remote Sensing of Environment*, 83(1), 3–15.
- Larrañaga, A., & Álvarez-Mozos, J. (2016). On the Added Value of Quad-Pol Data in a Multi-Temporal Crop Classification Framework Based on RADARSAT-2 Imagery. *Remote Sensing*, 8(4), 335.
- Liang, L., Schwartz, M. D., Wang, Z., Gao, F., Schaaf, C. B., Tan, B., ... Zhang, X. (2014). A Cross comparison of spatiotemporally enhanced springtime phenological measurements from satellites and ground in a northern U.S. mixed forest. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(12), 7513–7526.

- Lunetta, R. S., Knight, J. J., Ediriwickrema, J., Lyon, J. G., & Worthy, L. D. (2006). Land-Cover Change Detection Using Multi-Temporal MODIS NDVI Data. *Remote Sensing of Environment*, 105, 142-154.
- Militino, A. F., Ugarte, M. D., & Arnholt, A. T. (2015). *PROBABILITY and STATISTICS with R*. CRC Press. (949 pp.).
- Parra, F. (2015a). *ECONOMETRÍA CON SERIES DE FOURIER*. (222 pp.). Disponible en <https://econometria.files.wordpress.com/2008/11/microsoft-word-curso-series-de-fourier-v320150224194927.pdf> (último acceso 19/09/2016).
- Parra, F. (2015b). Package “descomponer.” Disponible en <https://CRAN.R-project.org/package=descomponer> (último acceso 19/09/2016).
- Parra, F. (2016). Documentos Técnicos. Curso de Estadística con R. (137 pp.). Disponible en http://www.icane.es/c/document_library/get_file?uuid=c2e9fff1-72d5-42ad-b391-bacb3ebe9dbe&groupId=10138 (último acceso 19/09/2016).
- Piotrowski, S., Carus, M., & Carrez, D. (2016). European Bioeconomy in Figures. *Industrial Biotechnology* (10 pp.).
- Ramsay, J. O., Wickham, H., Graves, S., & Hooker, G. (2015). Package “fda.” Disponible en <https://CRAN.R-project.org/package=fda> (último acceso 19/09/2016).
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Washington, DC, USA, 309-317.
- Rudorff, B. F. T., De Aguiar, D. A., Da Silva, W. F., Sugawara, L. M., Adami, M., & Moreira, M. A. (2010). Studies on the Rapid Expansion of Sugarcane for Ethanol Production in São Paulo State (Brazil) Using Landsat Data. *Remote Sensing*, 2(2), 1057–1076.
- Sakamoto, T., Yokozawa, M., Toritani, H., Shibayama, M., Ishitsuka, N., & Ohno, H. (2005). A crop phenology detection method using time-series MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 96, 366-374.
- Skriver, H. (2007). Signatures of polarimetric parameters and their implications on land cover classification. *2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 4195–4198.
- Swain, P. H., & King, R. C. (1973). Two Effective Feature Selection Criteria for Multispectral Remote Sensing. *Laboratory for Applications of Remote Sensing (LARS) Technical Reports*, 39, 1–6.
- SWD/2014/0259 final. State of play on the sustainability of solid and gaseous biomass used for electricity, heating and cooling in the EU.
- Tuck, A. S., & Phillips, H. (2016). Package “MODISTools.” Disponible en <https://CRAN.R-project.org/package=MODISTools> (último acceso 19/09/2016).
- Tuck, S. L., Phillips, H. R. P., Hintzen, R. E., Scharlemann, J. P. W., Purvis, A., & Hudson, L. N. (2014). MODISTools - downloading and processing MODIS remotely sensed data in R. *Ecology and Evolution*, 4(24), 4658-4668.
- UPNa (2015). Usando la Biomasa Forestal como una Fuente de Energía Sostenible (167 pp.)
- USGS (2016). MODIS MOD13Q1 Product, Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m. Disponible en https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table/mod13q1 (último acceso 19/09/2016).

- Wardlow, B. D., Egbert, S. L., & Kastens, J. H. (2007). Analysis of time-series MODIS 250 m vegetation index data for crop classification in the U.S. Central Great Plains. *Remote Sensing of Environment*, 108(3), 290–310.
- Wu, C., Gonsamo, A., Gough, C. M., Chen, J. M., & Xu, S. (2014). Modeling growing season phenology in North American forests using seasonal mean vegetation indices from MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 147, 79–88.
- Xue, Z., Du, P., Member, S., & Feng, L. (2013). Phenology-Driven Land Cover Classification and Trend Analysis Based on Long-term Remote Sensing Image Series. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(4), 1142–1156.
- Zhang, X., Friedl, M. A., Schaaf, C. B., Strahler, A. H., Hodges, J. C. F., Gao, F., Reed, B. C., & Huete, A. (2003). Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 84, 471–475.

6 Anexos

Anexo 1. Artículo 17 de la DIRECTIVA 2009/28/CE

Artículo 17 Criterios de sostenibilidad para los biocarburantes y biolíquidos

1. Independientemente de que las materias primas se hayan cultivado dentro o fuera del territorio de la Comunidad, la energía procedente de biocarburantes y biolíquidos se tendrá en cuenta para los fines contemplados en las letras a), b) y c) solamente si cumplen los criterios de sostenibilidad establecidos en los apartados 2 a 6:

- a) para evaluar el cumplimiento de los requisitos de la presente Directiva en relación con los objetivos nacionales;
- b) para evaluar el cumplimiento de las obligaciones de utilizar energías renovables;
- c) para determinar la posibilidad de optar a una ayuda financiera al consumo de biocarburantes y biolíquidos.

Sin embargo, los biocarburantes y biolíquidos producidos a partir de desechos y de residuos, con excepción de los residuos agrícolas, de la acuicultura, pesqueros y forestales, únicamente han de cumplir los criterios de sostenibilidad previstos en el apartado 2 para que se tengan en cuenta para los fines contemplados en las letras a), b) y c).

2. La reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero derivada del uso de biocarburantes y biolíquidos considerados para los fines contemplados en el apartado 1, letras a), b) y c), será de un 35 % como mínimo.

Con efectos a partir del 1 de enero de 2017, la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero derivada del uso de biocarburantes y biolíquidos considerados para los fines contemplados en el apartado 1, letras a), b) y c), será de un 50 % como mínimo. A partir del 1 de enero de 2018, dicha reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero será del 60 % como mínimo para los biocarburantes y biolíquidos producidos en instalaciones cuya producción haya comenzado a partir del 1 de enero de 2017.

La reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero derivadas del uso de biocarburantes y biolíquidos se calculará conforme a lo dispuesto en el artículo 19, apartado 1.

En el caso de los biocarburantes y biolíquidos producidos por instalaciones operativas el 23 de enero de 2008, el párrafo primero será aplicable a partir del 1 de abril de 2013.

3. Los biocarburantes y biolíquidos que se tengan en cuenta para los fines contemplados en el apartado 1, letras a), b) y c), no se producirán a partir de materias primas procedentes de tierras de elevado valor en cuanto a biodiversidad, es decir tierras que a partir de enero de 2008 pertenecían a una de las siguientes categorías, con independencia de que sigan encontrándose en la misma situación:

- a) bosques primarios y otras superficies boscosas, es decir, bosques y otras superficies boscosas de especies nativas, cuando no hay signos visibles claros de actividad humana y los procesos ecológicos no están perturbados significativamente;
- b) zonas designadas:
 - i) por ley o por las autoridades competentes pertinentes con fines de protección de la naturaleza, o

ii) para la protección de las especies o los ecosistemas raros, amenazados o en peligro, reconocidos por acuerdos internacionales o incluidos en listas elaboradas por organizaciones intergubernamentales o la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza, a condición de que dichas zonas hayan sido reconocidas de conformidad con el artículo 18, apartado 4, párrafo segundo, a menos que se demuestre que la producción de tales materias primas no ha interferido con dichos fines de protección de la naturaleza;

c) prados y pastizales con una rica biodiversidad:

i) naturales, es decir, prados y pastizales que seguirían siéndolo a falta de intervención humana y que conservan la composición en especies naturales y las características y procesos ecológicos, o

ii) no naturales, es decir, prados y pastizales que dejarían de serlo a falta de intervención humana, que son ricos en especies y no están degradados, salvo que se demuestre que la explotación de las materias primas es necesaria para preservar su condición de prados y pastizales.

La Comisión determinará los criterios y áreas geográficas que permitan designar los prados y pastizales cubiertos por el párrafo primero, letra c). Estas medidas, destinadas a modificar elementos no esenciales de la presente Directiva completándola, se adoptarán con arreglo al procedimiento de reglamentación con control contemplado en el artículo 25, apartado 4.

4. Los biocarburantes y biolíquidos que se tengan en cuenta para los fines contemplados en el apartado 1, letras a), b) y c), no se fabricarán a partir de materias primas procedentes de tierras con elevadas reservas de carbono, es decir tierras que en enero de 2008 pertenecían a una de las siguientes categorías pero que ya no se encuentran en dicha situación:

a) humedales, es decir, tierras cubiertas de agua o saturadas por agua permanentemente o durante una parte importante del año;

b) zonas arboladas continuas, es decir tierras con una extensión superior a una hectárea, con árboles de una altura superior a cinco metros y una cubierta de copas superior al 30 %, o con árboles que pueden alcanzar dichos límites in situ;

c) tierras con una extensión superior a una hectárea, con árboles de una altura superior a cinco metros y una cubierta de copas de entre el 10 % y el 30 %, o con árboles que pueden alcanzar dichos límites in situ, salvo si se aportan pruebas de que las reservas de carbono de la zona en cuestión antes y después de la conversión son tales que, cuando se aplica la metodología contemplada en el anexo V, parte C, se cumplen las condiciones establecidas en el apartado 2 del presente artículo.

Lo dispuesto en el presente apartado no será de aplicación si, en el momento de obtener las materias primas, las tierras pertenecían a la misma categoría que en enero de 2008.

5. Los biocarburantes y biolíquidos que se tengan en cuenta para los fines contemplados en el apartado 1, letras a), b) y c), no provendrán de materias primas extraídas de tierras que, a enero de 2008, fueran turberas, a no ser que se aporten pruebas de que el cultivo y la recolección de esta materia prima no implican el drenaje de suelos no drenados con anterioridad.

6. Las materias primas agrícolas cultivadas en la Comunidad y utilizadas para la producción de biocarburantes y biolíquidos que se tengan en cuenta para los fines

contemplados en el apartado 1, letras a), b) y c), se obtendrán de conformidad con los requisitos y normas previstos en las disposiciones a que se refiere el título «Medio ambiente» en la parte A y en el punto 9 del anexo II del Reglamento (CE) no 73/2009 del Consejo, de 19 de enero de 2009, por el que se establecen disposiciones comunes aplicables a los regímenes de ayuda directa a los agricultores en el marco de la política agrícola común y se instauran determinados regímenes de ayuda a los agricultores¹, y de conformidad con los requisitos mínimos de las buenas condiciones agrarias y medioambientales definidos con arreglo al artículo 6, apartado 1, de dicho Reglamento.

7. La Comisión informará cada dos años al Parlamento Europeo y al Consejo, en relación con los terceros países y los Estados miembros que constituyan una fuente importante de biocarburantes o de materias primas para biocarburantes consumidos en la Comunidad y que tratará sobre las medidas nacionales adoptadas para cumplir los criterios de sostenibilidad establecidos en los apartados 2 a 5, y para proteger el suelo, el agua y el aire. El primer informe se presentará en 2012.

La Comisión informará cada dos años al Parlamento Europeo y al Consejo sobre las consecuencias para la sostenibilidad social en la Comunidad y en terceros países del incremento de la demanda de biocarburantes, y sobre las consecuencias de la política de la Comunidad en materia de biocarburantes para la disponibilidad de productos alimenticios a un precio asequible, en particular para las personas que viven en los países en desarrollo, así como sobre cuestiones generales relacionadas con el desarrollo. En el informe se abordará el respeto de los derechos del uso del suelo. También se declarará, para los terceros países y los Estados miembros que sean una fuente significativa de materia prima para los biocarburantes consumidos en la Comunidad, si el país ha ratificado y aplicado cada uno de los siguientes convenios de la Organización Internacional del Trabajo:

- Convenio relativo al trabajo forzoso u obligatorio (no 29),

- Convenio relativo a la libertad sindical y a la protección del derecho de sindicación (no 87),

- Convenio relativo a la aplicación de los principios del derecho de sindicación y de negociación colectiva (no 98),

- Convenio relativo a la igualdad de remuneración entre la mano de obra masculina y la mano de obra femenina por un trabajo de igual valor (no 100),

- Convenio relativo a la abolición del trabajo forzoso (no 105),

- Convenio relativo a la discriminación en materia de empleo y ocupación (no 111),

- Convenio sobre la edad mínima de admisión al empleo (no 138),

- Convenio sobre la prohibición de las peores formas de trabajo infantil y la acción inmediata para su eliminación (no 182).

¹ DO L 30 de 31.1.2009, p. 16.

En los informes se declarará, para los terceros países y los Estados miembros que sean una fuente significativa de materia prima para los biocarburantes consumidos en la Comunidad, si el país ha ratificado y aplicado:

- el Protocolo de Bioseguridad de Cartagena,

- la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres.

El primer informe se presentará en 2012. La Comisión, si procede, propondrá medidas correctivas, en particular si hay pruebas que demuestren que la producción de los biocarburantes incide de forma considerable en el precio de los productos alimenticios.

8. Los Estados miembros no se negarán a tener en cuenta, para los fines contemplados en el apartado 1, letras a), b) y c), los biocarburantes y biolíquidos obtenidos de conformidad con el presente artículo, por otros motivos de sostenibilidad.

9. A más tardar el 31 de diciembre de 2009, la Comisión informará sobre los requisitos de un sistema de sostenibilidad para los usos energéticos de la biomasa, distintos de los biocarburantes y biolíquidos. El informe irá acompañado, en su caso, de propuestas al Parlamento Europeo y al Consejo relativas a un sistema de sostenibilidad para otros usos energéticos de la biomasa. Dicho informe y las propuestas se basarán en la mejor información científica de que se disponga, teniendo en cuenta la evolución más reciente del proceso de innovación. Si el análisis efectuado para ello demuestra que sería conveniente introducir modificaciones, en relación con la biomasa forestal, en la metodología de cálculo del anexo V o en los criterios de sostenibilidad relativos al carbono almacenado aplicados a los biocarburantes y biolíquidos, la Comisión, cuando proceda, presentará propuestas al Parlamento Europeo y al Consejo simultáneamente en este sentido.

Anexo 2. Puntos de muestreo. Donde las unidades de latitud y longitud son en grados decimales, la altitud en metros y la superficie en m².

Uso del suelo	Id muestra	Latitud	Longitud	Altitud	Superficie
Agrícola	1	-13,3107	-58,7409	543	5.062.500
	2	-14,0379	-59,1522	682	5.062.500
	3	-13,8901	-57,9155	602	5.062.500
	4	-14,7169	-57,0080	217	5.062.500
	5	-13,9824	-56,5548	490	5.062.500
	6	-12,4396	-56,1227	383	5.062.500
	7	-12,0745	-55,8197	380	5.062.500
	8	-12,5173	-52,2212	350	5.062.500
	9	-15,3310	-54,4936	701	5.062.500
	10	-17,4025	-54,8568	476	5.062.500
Área artificial	11	-11,8542	-55,5078	372	250
	12	-11,8421	-55,5138	372	250
	13	-11,8829	-55,5077	376	250
	14	-12,5381	-55,7336	384	250
	15	-12,5454	-55,7327	383	250
	16	-12,5395	-55,7219	371	250
	17	-15,5984	-56,1069	198	5.062.500
	18	-15,5625	-56,0504	221	250
	19	-16,4382	-54,6336	275	5.062.500
	20	-16,4618	-54,6308	246	250
Agua continental	21	-12,7963	-55,9987	356	250
	22	-12,3268	-53,0652	254	250
	23	-10,0265	-52,9446	269	250
	24	-10,9094	-53,2781	275	250
	25	-9,5891	-58,2652	199	250
	26	-12,2313	-50,9146	201	250
	27	-14,8284	-55,6556	267	250
	28	-16,2512	-55,8924	131	250
	29	-17,0148	-58,3921	101	250
	30	-16,6220	-57,4767	103	250
Pastos naturales	31	-14,2333	-58,5909	686	5.062.500
	32	-13,2188	-58,4645	511	5.062.500
	33	-15,2672	-59,8169	208	5.062.500
	34	-17,0146	-58,0683	100	5.062.500

	35	-14,3379	-55,2993	327	5.062.500
	36	-16,5585	-55,6984	145	5.062.500
	37	-13,3298	-51,0394	221	5.062.500
	38	-12,0478	-50,9912	201	5.062.500
	39	-16,4828	-52,8277	521	250
	40	-16,6000	-53,0113	655	250
Pastos plantados	41	-16,6052	-54,5752	313	250
	42	-15,3608	-58,9978	411	250
	43	-15,3923	-58,4715	290	250
	44	-13,7765	-59,8854	484	250
	45	-11,5172	-57,7690	279	5.062.500
	46	-10,5951	-55,2593	298	250
	47	-16,6095	-58,2332	134	250
	48	-14,5339	-57,4272	319	250
	49	-11,4612	-51,7350	271	5.062.500
	50	-14,0111	-52,5680	352	250
Vegetación silvestre	51	-13,3099	-58,2576	500	5.062.500
	52	-13,0823	-58,2392	449	5.062.500
	53	-13,2966	-59,5595	515	5.062.500
	54	-12,7618	-59,3827	431	5.062.500
	55	-12,5564	-58,8859	356	5.062.500
	56	-12,4660	-59,0851	402	5.062.500
	57	-12,3480	-59,5062	428	5.062.500
	58	-14,7368	-59,6999	678	250
	59	-14,7034	-58,5572	599	250
	60	-13,0513	-58,3893	480	5.062.500
Silvicultura	61	-17,3272	-53,3091	693	250
	62	-17,3463	-53,3199	725	250
	63	-17,4094	-53,3162	750	5.062.500
	64	-16,4158	-54,8791	342	5.062.500
	65	-16,4025	-54,8758	339	250
	66	-16,5150	-53,8473	581	250
	67	-16,1205	-58,4622	169	250
	68	-16,1310	-58,4413	156	250
	69	-15,1750	-59,1927	318	250
	70	-15,1256	-59,1878	317	250
Vegetación forestal	71	-13,0472	-59,8206	581	5.062.500
	72	-11,1332	-59,6270	363	5.062.500

	73	-10,7156	-58,2244	259	5.062.500
	74	-12,6889	-57,5319	325	5.062.500
	75	-13,0009	-56,8590	330	5.062.500
	76	-11,6549	-53,8526	353	5.062.500
	77	-12,9554	-54,4860	343	5.062.500
	78	-14,5311	-52,1025	302	5.062.500
	79	-14,7764	-59,4837	310	5.062.500
	80	-9,3495	-58,7618	259	5.062.500
Mosaico agrícola	81	-14,3701	-56,4459	392	5.062.500
	82	-15,1715	-55,2931	406	5.062.500
	83	-15,1499	-55,2886	428	5.062.500
	84	-17,0122	-54,4662	361	5.062.500
	85	-16,5614	-55,4912	159	5.062.500
	86	-16,6301	-55,9835	136	5.062.500
	87	-17,5269	-55,1947	303	5.062.500
	88	-17,4500	-55,1798	273	5.062.500
	89	-16,8267	-54,1995	388	5.062.500
	90	-16,6012	-58,1268	108	5.062.500
Mosaico forestal	91	-12,4490	-54,4086	372	5.062.500
	92	-12,1902	-54,3439	370	5.062.500
	93	-13,7374	-50,9843	232	5.062.500
	94	-13,6035	-50,8974	229	5.062.500
	95	-13,1009	-52,9427	374	5.062.500
	96	-16,7502	-57,8532	111	5.062.500
	97	-17,1331	-57,6959	100	5.062.500
	98	-16,8611	-56,3320	125	5.062.500
	99	-10,6221	-58,4127	254	5.062.500
	100	-11,0606	-58,9073	366	5.062.500
Mosaico silvestre	101	-13,199	-52,956	322	250
	102	-13,152	-52,928	319	250
	103	-13,184	-52,941	315	250
	104	-16,345	-53,348	714	250
	105	-16,350	-53,266	687	250
	106	-15,606	-51,781	290	250
	107	-17,809	-53,342	837	250
	108	-17,825	-53,360	826	250
	109	-17,839	-53,314	887	250
	110	-12,763	-52,872	298	250

Vegetación silvestre inundada	111	-12,1032	-53,8349	284	5.062.500
	112	-12,3238	-53,2079	285	5.062.500
	113	-10,8901	-53,2046	274	5.062.500
	114	-12,1842	-51,9675	298	5.062.500
	115	-16,2111	-55,8680	132	5.062.500
	116	-16,5380	-55,1118	302	5.062.500
	117	-17,6464	-57,4255	94	5.062.500
	118	-17,4416	-58,0032	95	5.062.500
	119	-16,9003	-58,4319	98	5.062.500
	120	-16,9343	-57,4486	101	5.062.500
Caña de azúcar	121	-13,744	-57,796	526	250
	122	-14,893	-57,199	199	250
	123	-14,819	-57,018	207	250
	124	-15,965	-54,879	273	250
	125	-17,667	-53,334	853	250
	126	-10,686	-51,404	234	250
	127	-13,757	-57,881	582	250
	128	-14,213	-59,199	704	5.062.500
	129	-14,271	-59,212	714	5.062.500
	130	-14,691	-57,605	399	250

Anexo 3. Distancias de *Jeffries-Matusita* entre clases para cada parámetro.

Parámetro EVI_{max} = máximo valor de EVI.

	"1"	"2"	"3"	"4"	"5"	"6"	"7"	"8"	"9"	"10"	"11"	"12"	"13"
"1"	0	1.864	1.956	1.496	0.599	0.805	0.189	0.848	1.024	0.72	0.461	0.572	0.316
"2"	NA	0	1.419	0.811	1.9	1.832	1.895	2	1.911	1.997	1.634	1.238	1.762
"3"	NA	NA	0	1.696	1.986	1.976	1.979	2	1.99	2	1.894	1.606	1.939
"4"	NA	NA	NA	0	1.155	0.882	1.384	1.902	0.89	1.642	0.831	0.494	1.071
"5"	NA	NA	NA	NA	0	0.066	0.195	0.532	0.211	0.133	0.064	0.237	0.078
"6"	NA	NA	NA	NA	NA	0	0.405	0.851	0.052	0.327	0.102	0.204	0.194
"7"	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	0.49	0.648	0.292	0.152	0.333	0.049
"8"	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	1.202	0.24	0.671	0.914	0.558
"9"	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	0.55	0.26	0.341	0.392
"10"	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	0.307	0.558	0.257
"11"	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	0.075	0.03
"12"	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	0.159
"13"	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0

Parámetro t_{max} = día en el que se alcanza el EVI máximo

	"1"	"2"	"3"	"4"	"5"	"6"	"7"	"8"	"9"	"10"	"11"	"12"	"13"
"1"	0	0.102	0.083	0.109	0.122	0.048	0.046	0.433	0.028	0.013	0.017	0.072	0.119
"2"	NA	0	0.171	0.331	0.019	0.24	0.192	0.729	0.078	0.167	0.175	0.254	0.022
"3"	NA	NA	0	0.073	0.266	0.063	0.02	0.215	0.183	0.062	0.06	0.037	0.268
"4"	NA	NA	NA	0	0.407	0.013	0.026	0.167	0.239	0.047	0.041	0.008	0.406
"5"	NA	NA	NA	NA	0	0.293	0.262	0.88	0.061	0.204	0.215	0.329	0
"6"	NA	NA	NA	NA	NA	0	0.013	0.245	0.143	0.011	0.008	0.008	0.291
"7"	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	0.221	0.142	0.017	0.015	0.006	0.262
"8"	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	0.647	0.324	0.311	0.183	0.881
"9"	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	0.076	0.085	0.186	0.057
"10"	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	0	0.027	0.201
"11"	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	0.023	0.213
"12"	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	0.329
"13"	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0

Parámetro EVI_{min} = mínimo valor de EVI.

	"1"	"2"	"3"	"4"	"5"	"6"	"7"	"8"	"9"	"10"	"11"	"12"	"13"
"1"	0	0.614	0.798	0.16	0.816	1.067	1.118	1.961	0.501	1.66	0.462	0.695	0.041
"2"	NA	0	1.904	0.298	0.695	1.295	1.373	1.998	0.6	1.828	0.944	1.088	0.509
"3"	NA	NA	0	1.465	1.971	1.861	1.746	2	1.771	1.99	1.269	1.464	1.064
"4"	NA	NA	NA	0	0.421	0.908	1.042	1.969	0.214	1.601	0.47	0.66	0.062
"5"	NA	NA	NA	NA	0	0.799	1.049	1.974	0.166	1.502	0.682	0.784	0.563
"6"	NA	NA	NA	NA	NA	0	0.151	0.978	0.459	0.236	0.181	0.107	0.834
"7"	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	0.514	0.732	0.157	0.226	0.084	0.953
"8"	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	1.859	0.404	1.11	0.85	1.92
"9"	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	1.187	0.313	0.427	0.269
"10"	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	0.546	0.341	1.497
"11"	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	0.036	0.339
"12"	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	0.546
"13"	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0

Parámetro t_{min} = día en el que se alcanza el EVI mínimo.

	"1"	"2"	"3"	"4"	"5"	"6"	"7"	"8"	"9"	"10"	"11"	"12"	"13"
"1"	0	0.033	0.131	0.001	0.574	0.198	0.142	0.721	0.505	0.073	0.424	0.258	0.239
"2"	NA	0	0.206	0.043	0.438	0.114	0.291	0.931	0.369	0.188	0.281	0.425	0.107
"3"	NA	NA	0	0.119	0.843	0.494	0.165	0.588	0.782	0.082	0.692	0.196	0.438
"4"	NA	NA	NA	0	0.598	0.219	0.124	0.688	0.53	0.059	0.449	0.234	0.26
"5"	NA	NA	NA	NA	0	0.192	0.894	1.401	0.006	0.805	0.043	1.018	0.272
"6"	NA	NA	NA	NA	NA	0	0.504	1.12	0.14	0.418	0.107	0.657	0.13
"7"	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	0.287	0.836	0.02	0.774	0.03	0.613
"8"	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	1.365	0.398	1.334	0.147	1.241
"9"	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	0.742	0.019	0.965	0.214
"10"	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	0.668	0.067	0.474
"11"	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	0.906	0.119
"12"	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	0.742
"13"	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0

Parámetro Δt = tiempo de subida.

	"1"	"2"	"3"	"4"	"5"	"6"	"7"	"8"	"9"	"10"	"11"	"12"	"13"
"1"	0	0.102	0.014	0.027	0.147	0.057	0.006	0.215	0.652	0.036	0.023	0.071	0.21
"2"	NA	0	0.106	0.16	0.201	0.237	0.149	0.074	0.916	0.053	0.216	0.043	0.388
"3"	NA	NA	0	0.007	0.229	0.117	0.033	0.162	0.742	0.016	0.049	0.041	0.304
"4"	NA	NA	NA	0	0.27	0.127	0.041	0.212	0.742	0.039	0.045	0.072	0.324
"5"	NA	NA	NA	NA	0	0.076	0.129	0.438	0.513	0.243	0.163	0.283	0.062
"6"	NA	NA	NA	NA	NA	0	0.029	0.435	0.439	0.171	0.029	0.231	0.066
"7"	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	0.29	0.585	0.072	0.007	0.119	0.165
"8"	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	1.103	0.08	0.362	0.041	0.629
"9"	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	0.818	0.56	0.889	0.272
"10"	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	0.108	0.006	0.357
"11"	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	0.165	0.168
"12"	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	0.42
"13"	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0

Parámetro Amplitud

	"1"	"2"	"3"	"4"	"5"	"6"	"7"	"8"	"9"	"10"	"11"	"12"	"13"
"1"	0	1.892	1.885	1.433	1.018	1.57	1.303	1.749	1.131	1.531	0.65	1.539	0.355
"2"	NA	0	0.071	0.946	1.903	1.231	1.537	0.709	1.497	1.05	1.254	0.995	1.788
"3"	NA	NA	0	0.881	1.897	1.222	1.524	0.729	1.476	1.023	1.179	0.962	1.776
"4"	NA	NA	NA	0	0.689	0.1	0.18	0.308	0.219	0.036	0.328	0.031	0.919
"5"	NA	NA	NA	NA	0	0.879	0.286	1.483	0.159	0.823	0.373	0.854	0.336
"6"	NA	NA	NA	NA	NA	0	0.209	0.271	0.329	0.019	0.573	0.028	1.122
"7"	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	0.758	0.035	0.195	0.35	0.22	0.685
"8"	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	0.835	0.238	0.846	0.215	1.478
"9"	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	0.286	0.221	0.307	0.475
"10"	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	0.477	0.001	1.061
"11"	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	0.476	0.23
"12"	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	1.077
"13"	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0

Parámetro EVI_{mean} = valor medio de EVI.

	"1"	"2"	"3"	"4"	"5"	"6"	"7"	"8"	"9"	"10"	"11"	"12"	"13"
"1"	0	1.428	1.835	0.977	0.253	0.161	0.124	0.877	0.49	0.349	0.055	0.029	0.155
"2"	NA	0	1.71	0.662	1.758	1.847	1.657	2	1.929	1.99	1.548	1.215	1.532
"3"	NA	NA	0	1.895	1.987	1.992	1.904	2	1.998	2	1.934	1.624	1.949
"4"	NA	NA	NA	0	1.075	1.351	1.337	1.999	1.315	1.878	0.978	0.829	0.854
"5"	NA	NA	NA	NA	0	0.086	0.584	1.625	0.074	0.789	0.088	0.333	0.029
"6"	NA	NA	NA	NA	NA	0	0.39	1.245	0.238	0.403	0.055	0.278	0.099
"7"	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	0.591	0.819	0.266	0.3	0.158	0.484
"8"	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	1.874	0.403	1.159	0.952	1.476
"9"	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	1.08	0.284	0.574	0.173
"10"	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	0.458	0.485	0.718
"11"	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	0.119	0.037
"12"	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0	0.206
"13"	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0

Anexo 4. Código en R.

DESCARGA DE DATOS MODIS

Autor: Mikel Viñuales Lasheras

Mail: mikelvinu@gmail.com

1. Automatización de descarga

library(MODISTools)

coord<-c(-14.0379, -59.1522) # coordenadas de punto de descarga

product<-"MOD13Q1" # producto que deseamos descargar

#GetBands("MOD13Q1")

bands<-c("250m_16_days_EVI","250m_16_days_pixel_reliability")

directory=dire

Obtener área, es en km --(IMPORTANTE ESPECIFICAR AREA)--

pixel<-c(1,1) ## para descargar un pixel → c(0,0)

Periodo de descarga

period<-data.frame(lat=coord[1],long=coord[2],start.date=2010,end.date=2010,id=1)

Descarga de datos. MODIS Subset

MODISSubsets(LoadDat= period, Products= product, Bands= bands, Size= pixel,
SaveDir= directory, StartDate= T)**FILTRAR VALORES SEGÚN FIABILIDAD**

Autor: Mikel Viñuales Lasheras

Mail: mikelvinu@gmail.com

Dimensiones del archivo

filas<-nrow(data)

colu<-ncol(data)

Estos umbrales los utilizaremos para dividir el archivo

filmit<-filas/2

filmas<-filmit+1

Separamos los datos originales en dos tablas (cogemos todos los datos pero también se puede limitar)

```
datos<-(data[1:filmit,11:colu])/10000 # divido entre 10000 para obtener los verdaderos
valores de EVI
fiabi<-data[filmas:filas,11:colu] # la fiabilidad de los datos
# Los valores con una fiabilidad >=2 o <0 les asignaremos un NA.
for(i in 1:filmit)
  datos[ i,which(fiabi[i,]>=2|fiabi[i,]<0)]=NA # pongo o más pequeño que 0 por si
  por algún motivo hay valores menores.
## Para los casos donde se esté procesando un único pixel no hará falta el for, sino:
datos[which(fiabi>=2|fiabi<0)]=NA # pongo o más pequeño que 0 por si por algún motivo
hay valores menores..
# Calculamos las medianas de las series temporales de los pixeles (citar que la
medianas no es por pixel sino por fecha)
# Es decir la calcularemos por filas y de este modo obtendremos la serie temporal media
de la zona.
datosmedian<-apply(datos,1,median,na.rm=T)
```

INTERPOLACIÓN

Autor: Mikel Viñuales Lasheras

Mail: mikelvinu@gmail.com

#Para los datos que falten (por el valor de fiabilidad hemos decidido que no eran fiables), se realizará una interpolación lineal, basándonos en semejanzas de triángulos.

```
len<-length(datos)
```

```
len
```

```
for(i in 1:len)
```

```
  if (is.na(datos[i])){
```

```
    if(i==1){ ## he separado si es primero o ultimo, es más código, pero en trabaja menos,
ya que comienzan de diferentes lados.
```

```
      p=2
```

```
      while (is.na(datos[p])){p=p+1}
```

```
      o=len # en este caso el final, pero si la serie es multi anual se debe coger el dato
final del año,
```

```
      while (is.na(datos[o])){o=o-1} # si no el comienzo de la más cercana.
```

```
      datos[i]=(datos[o]-datos[p])*(p-1)/(len-o+p)+datos[p] # Interpolación (semejanza de
triangulos)
```

```
    } # como es el primero realizamos cambios en el eje de las x
```

```
  else if (i==len){
```

```
    p=1
```

```
    while (is.na(datos[p])){p=p+1}
```

```
o=(len-1)
while (is.na(datos[o])){o=o-1}

datos[i]=(datos[o]-datos[p])*(p)/(len-o+p)+datos[p]
}

else if (is.na(datos[i-1])|is.na(datos[i+1])){ # hay que tener cuidado si la serie acaba
en NA
    p=i+1 # ya que no parara el while.
    while (is.na(datos[p])){
        if (p==len){# ajustamos esta condición, porque puede ser que el bucle no pare.
            p=1}
        else{p=p+1}
    }

    o=i-1
    while (is.na(datos[o])){o=o-1}

    if (p==1){
        p=len+1 # le sumamos 1 porque sería el siguiente del final de la serie.
        datos[i]=(datos[o]-datos[1])*(p-i)/(p-o)+datos[1]}

    else{datos[i]=(datos[o]-datos[p])*(p-i)/(p-o)+datos[p]

}
}

else{
    datos[i]=(datos[i-1]+datos[i+1])/2
}
}
```

ANÁLISIS DE FOURIER

Autor: Mikel Viñuales Lasheras. Colaboración: Francisco Parra Rodríguez.

Mail: mikelvinu@gmail.com

```
### Fourier
```

```
library (descomponer)
```

```
y<-datosfinal # conjunto de datos
```

```
pe<-periodograma(y)
```

```
gperiodograma(y) # obtenemos el periodograma.
```

```
pe
```

```
library(fda)
```

```
library(fda.usc)
```

```
fourier<-create.fourier.basis(rangeval = 23,nbasis = 5)
```

```
plot(fourier)
```

```
fourier.fd<-smooth.basis(argvals = vec, y =datosfinal,fdParobj = fourier)
```

```
## Calculo de valores de la curva suavizada
```

```
suavi<-fourier.fd$y2cMap[1,]* fourier.fd$fd$coefs[1]+fourier.fd$y2cMap[2,]*
```

```
fourier.fd$fd$coefs[2]+fourier.fd$y2cMap[3,]*
```

```
fourier.fd$fd$coefs[3]+fourier.fd$y2cMap[4,]*
```

```
fourier.fd$fd$coefs[4]+fourier.fd$y2cMap[5,]* fourier.fd$fd$coefs[5]
```

PARÁMETROS DE INTERÉS

Autor: Mikel Viñuales Lasheras

Mail: mikelvinu@gmail.com

```
# Día del año máximo y mínimo
```

```
dmax<-which.max(suavi)*16-15 # las observaciones son cada 16 días luego le restamos  
15 para saber el día exacto.
```

```
dmin<-which.min(suavi)*16-15
```

```
dsubida<-dmax-dmin #diferencia en días entre el mínimo y máximo
```

```
# Valor positivo será tiempo de subida, valor negativo será tiempo de bajada
```

```
if (dsubida<0)
```

```
  dsubida<-365+dsubida ## obtendremos el tiempo de subida
```

```
dtbajada<-365-dsubida
```

```
dtbajada
```

```
# Valor máximo y mínimo
```

```
maxi<-round(max(suavi2),4)
```

```
mini<-round(min(suavi2),4)
```

```
dfampli<-maxi-mini
```



```
# Valor medio
```

```
medi<-round(mean(suavi2),4)
```

DISTANCIA DE JEFFRIES-MATUSITA

```
# Función facilitada por: Jesús Álvarez Mozos. Es una adaptación de una función de Nikos Alexandris.
```

```
sepMatrix <- function(tabla) {
```

```
# calcular el número de columnas de datos
```

```
col_dat <- ncol(tabla)- 1
```

```
# Bucle para que vaya pasando de columna a columna
```

```
for(i in 1:col_dat)
```

```
{
```

```
  # calcular el número de cultivos según los códigos de la última columna
```

```
  ncrop <- max(tabla[,ncol(tabla)])
```

```
  # crear una matriz de ncropXncrop para cada banda en la que se vayan poniendo las separabilidades como en una matriz de contingencia
```

```
  sepMatrix_name <- paste("sepMatrix_", colnames(tabla[i]))
```

```
  sepMatrix <- matrix(nrow = ncrop, ncol=ncrop)
```

```
  # Bucle para que vaya pasando de cultivo a cultivo
```

```
  for(j in 1:ncrop)
```

```
  {
```

```
    # definir un vector con los datos del cultivo j para la banda i
```

```
    Vector.1 <- subset(tabla, Reclass==j, select = i)
```

```
    # Bucle para ir pasando de cultivo a cultivo
```

```
    for(k in j:ncrop)
```

```
    {
```

```
      # definir otro vector con los datos del cultivo k para la banda i
```

```
      Vector.2 <- subset(tabla, Reclass==k, select = i)
```

```
      # calcular la distancia Jeffries-Matusita según el código de Nikos Alexandris "separability.measures.R":
```

```
      # convert vectors to matrices in case they are not
```

```
      Matrix.1 <- as.matrix (Vector.1)
```

```
      Matrix.2 <- as.matrix (Vector.2)
```

```
      # define means
```

```
      mean.Matrix.1 <- mean ( Matrix.1 )
```

```
      mean.Matrix.2 <- mean ( Matrix.2 )
```

```

# define difference of means
mean.difference <- mean.Matrix.1 - mean.Matrix.2
# define covariances for supplied matrices
cv.Matrix.1 <- cov ( Matrix.1 )
cv.Matrix.2 <- cov ( Matrix.2 )
# define the halfsum of cv's as "p"
p <- ( cv.Matrix.1 + cv.Matrix.2 ) / 2
# calculate the Bhattacharryya index
bh.distance <- 0.125 *
    t ( mean.difference ) *
    p^( -1 ) *
    mean.difference +
    0.5 * log (
        det ( p ) / sqrt (
            det ( cv.Matrix.1 ) *
            det ( cv.Matrix.2 )
        )
    )
# calculate Jeffries-Matusita
# following formula is bound between 0 and 2.0
jm.distance <- 2 * ( 1 - exp ( -bh.distance ) )
# also found in the bibliography:
# jm.distance <- 1000 * sqrt ( 2 * ( 1 - exp ( -bh.distance ) ) )
# the latter formula is bound between 0 and 1414.0
# guardar el dato de jm.distance en la matriz de separabilidad
sepMatrix en la fila i columna k
    sepMatrix[j,k] <- jm.distance
}
}
# calcular la separabilidad media para cada banda y mostrarla en pantalla
pos_sepMatrix <- sepMatrix[(!is.na(sepMatrix)) & sepMatrix>0]
sep_mean <- round (mean(pos_sepMatrix), digits = 3)
cat(paste(colnames(tabla[i]),": ", sep_mean, "\n"))
#convertir el nombre de la tabla a texto para asignarlo como nombre de archivo
outputfile_name <- as.character(sepMatrix_name)
# guardar la sepMatrix como .txt
write.table (round (sepMatrix , digits = 3) ,file = paste(outputfile_name,".txt") , sep
= "\t" , eol = "\n")
}
}

```