



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Evaluación de índices espectrales para detectar
cambios en la cubierta vegetal en el término
municipal de Fiscal (Huesca)

Evaluation of spectral indices to detect changes in
vegetation cover in Fiscal (Huesca)

Autor

Sergio Vicente Clavel

Directora

D^a Dhais Peña Angulo

Ciencias Ambientales

Escuela Politécnica Superior de Huesca

31 de mayo de 2024



**Escuela Politécnica
Superior - Huesca**
Universidad Zaragoza

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE HUESCA

MEMORIA

**Evaluación de índices espectrales para detectar
cambios en la cubierta vegetal en el término
municipal de Fiscal (Huesca)**

**Evaluation of spectral indices to detect changes in
vegetation cover in Fiscal (Huesca)**

Autor: Sergio Vicente Clavel

Director: D^a Dhais Peña Angulo

Fecha: 31 de mayo de 2024





Resumen

En este trabajo se muestran los cambios producidos en la cubierta vegetal del término municipal de Fiscal, situado en el pirineo oscense. Para ello, se ha llevado a cabo un estudio multitemporal de los meses de enero (invierno) y julio (verano) de los años 1990 y 2018, mediante el uso de imágenes satelitales obtenidas a través de Landsat 5 y 8, además de la información proporcionada por el proyecto CORINE Land Cover, sobre los usos del suelo. Al mismo tiempo, se ha realizado un análisis de los principales índices espectrales que pueden utilizarse para medir la cubierta vegetal de una zona específica y evaluar cuál de ellos es el más apropiado para la detección de estos cambios. Se ha comprobado que se ha producido un aumento de la cubierta vegetal ocupada por la categoría vegetal formada por bosques. Por el contrario, la superficie ocupada por vegetación herbácea y por zonas agrícolas ha experimentado una disminución, atravesando un proceso de abandono desde hace años. Los resultados demuestran que los índices espectrales GCI y NDVI reflejan de manera clara este incremento de la densidad vegetal y de la actividad fotosintética en los últimos 29 años de estudio. Estos resultados ponen de manifiesto la importancia de conocer el estado de la cubierta vegetal y ser capaces de anticiparnos a posibles escenarios de futuro.

Palabras clave: *cubierta vegetal, teledetección, estudio multitemporal, Landsat, índice espectral, CORINE Land Cover.*



Abstract

This work shows the changes produced in the vegetation cover of the municipality of Fiscal, located in the Huesca Pyrenees. For this purpose, a multi-temporal study of the months of January (winter) and July (summer) of the years 1990 and 2018 has been carried out, using satellite images obtained from Landsat 5 and 8, and the information provided by the CORINE Land Cover project on land use. At the same time, an analysis is made of the main spectral indices that can be used to measure the vegetation cover of a specific area and to evaluate which of them is the most appropriate for detecting these changes. It has been found that there has been an increase in the vegetation cover occupied by the vegetation category formed by forests. On the other hand, the area occupied by herbaceous vegetation and agricultural areas has been decreasing and has been abandoned for years. The results show that the GCI and NDVI spectral indices prove this increase in plant density and photosynthetic activity over the last 29 years of the study. These results highlight the importance of knowing the state of vegetation cover and being able to anticipate possible future scenarios.

Keywords: *vegetation cover, remote sensing, multi-temporal study, Landsat, spectral index.*



Índice de contenido

1. Introducción.....	6
1.1. Teledetección	6
1.2. Sistemas de Información Geográfica (SIG)	9
1.3. CORINE Land Cover (CLC)	10
1.4. Índices espectrales	11
2. Objetivos	11
3. Área de estudio	12
4. Material y métodos	15
4.1. Obtención de las principales categorías de cobertura vegetal para los años 1990 y 2018 en el municipio de Fiscal	17
4.2. Obtención de imágenes multiespectrales en enero y julio de 1990 y 2018 en el municipio de Fiscal	19
4.3. Estimación de los principales índices espectrales en la teledetección óptica en relación a la cobertura vegetal a partir de las imágenes obtenidas	21
4.4. Estimación los principales estadísticos de los índices espectrales para las principales categorías de la cobertura vegetal en enero y julio de 1990 y 2018 en el municipio de Fiscal.....	23
4.5. Evaluación de los índices espectrales en función de los estadísticos seleccionados, en cada una de las categorías establecidas para la estación, años y área de estudio	24
5. Resultados y discusión.....	25
5.1. Cambios en la cobertura vegetal en el periodo de estudio a partir de las categorías de Corine Land Cover (CLC)	25
5.2. Cambios en la cobertura vegetal en el periodo de estudio a partir de los índices espectrales.....	27
5.2.1. Comparación estacional de los índices espectrales en las cubiertas vegetales en el área de estudio.....	28
5.2.2. Comparación entre los índices espectrales en las cubiertas vegetales en el periodo y área de estudio	29
6. Conclusiones.....	36
7. Bibliografía	38
8. Anexos	40

Índice de figuras

Figura 1: Componentes y proceso del sistema de teledetección	6
Figura 2: Periodo de funcionamiento e imagen de cada misión Landsat	8
Figura 3: Componentes de un SIG	10
Figura 4: Mapa de localización del municipio de Fiscal	13
Figura 5: Climograma de Fiscal, precipitación (mm) en color azul, y temperatura media (°C, °F) en color rojo.....	14
Figura 6: Mapa de elevación del municipio de Fiscal.....	15
Figura 7: Cuadro-resumen de la metodología adoptada para la realización del trabajo	16
Figura 8: Ejemplo de recorte de una capa vectorial al área de estudio.....	17
Figura 9: Ejemplo del mapa final con las categorías del CLC	19
Figura 10: Ejemplo resultado recorte del área de estudio.....	23
Figura 11: Ejemplo tabla dinámica en Excel	24
Figura 12: Ejemplo tabla de datos incorporados en Excel	24
Figura 13: Superficie ocupada por las diferentes cubiertas del suelo (A, B, C) y el total en el municipio de Fiscal en los años 1990 (barra de arriba) y 2018 (barra de abajo)	25
Figura 14: Porcentaje de superficie que representa cada categoría de cubierta vegetal en Fiscal en los años 1990 y 2018	26
Figura 15: Composiciones CLC por categorías para los años 1990 y 2018 en Fiscal	27
Figura 16: Valores medios de los índices espectrales en enero y julio de 1990 en Fiscal	28
Figura 17: Valores medios de los índices espectrales en enero y julio de 2018 en Fiscal	29
Figura 18: Distribución espacial de los valores de los índices espectrales por cuartiles en julio de 1990 y 2018.....	30
Figura 20: Valores medios de índices espectrales por categoría de julio de 1990 y 2018	32
Figura 21: Valores medios de los índices espectrales en cada categoría de la cobertura vegetal (Zona A, Zona B, Zona C) en julio de 1990 y 2018	35
Figura 22: Mapa de orientación del municipio de Fiscal.	40



Figura 23: Mapa de pendiente del municipio de Fiscal.	411
Figura 24: Mapa de la clasificación climática de Köppen en el municipio de Fiscal.	41
Figura 25: Valores medios de índices espectrales por categoría en enero de 1990 y 2018	422

1. Introducción

El presente trabajo fin de grado se enmarca en la detección de cambios en la superficie terrestre, concretamente, en el análisis de la evolución temporal de la cobertura vegetal como un aspecto ambiental clave para entender el correcto funcionamiento de un ecosistema. El área de estudio es el término municipal de Fiscal, ubicado en el pirineo oscense. En líneas generales, para la realización de esta tarea se ha llevado a cabo un análisis multitemporal a través de imágenes multispectrales del satélite Landsat y el posterior procesado y tratamiento digital de datos realizado con un Sistema de Información Geográfica (SIG).

1.1. Teledetección

El término “teledetección” puede definirse como la adquisición de información sobre un objeto a distancia, es decir, sin que haya contacto material entre el objeto o sistema observado y el observador (López M. J. et al., 1991). Esto se logra mediante la detección y el análisis de la radiación electromagnética reflejada o emitida por los objetos de interés, a través de los sensores que portan los satélites. Existen dos tipos de sensores: pasivos y activos. En este estudio se utilizarán sensores pasivos, que son aquellos que no portan su propia fuente de irradiación, sino que capturan directamente la información procedente de la radiación solar que refleja la Tierra o que emiten los propios objetos terrestres.

Los factores que intervienen en la formación de una imagen mediante teledetección se muestran en la **figura 1**.

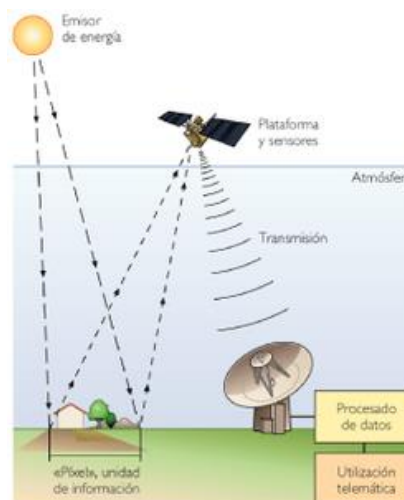


Figura 1: Componentes y proceso del sistema de teledetección. Fuente: Revolución Comunicación, n.d. (<https://revolucioncomunicacion.weebly.com/teledeteccioacuten.html>)

En los primeros años de la exploración espacial, los satélites se desarrollaron principalmente en un contexto geopolítico. El Sputnik 1 fue el primer satélite enviado a la órbita terrestre, en 1957, lanzado por la Unión Soviética, durante la Guerra Fría (Valdez, A. R., 2011). Con el paso de los años, los fines militares con los que fueron lanzados los satélites pasaron a tener propósitos científicos y geográficos. El Explorer 1, lanzado por Estados Unidos en 1958, fue el primer satélite capaz de lograr descubrimientos científicos significativos, como la identificación de los cinturones de radiación de Van Allen. En 1972, la NASA y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) lanzó Landsat 1, marcando el inicio de una serie de satélites dedicados a la observación de la Tierra (Di Leo, N., 2023). Inicialmente este satélite era conocido como el Satélite con Tecnología para el Estudio de los Recursos Terrestres (ERTS, por sus siglas en inglés). Landsat 1 fue equipado con un escáner multiespectral que podría capturar imágenes en cuatro bandas espectrales: dos en el visibles (rojo y verde) y dos en el infrarrojo cercano, permitiendo a los científicos distinguir entre diferentes tipos de vegetación y evaluar la salud de las plantas. Desde el lanzamiento de Landsat 1, se han creado y lanzado más satélites con mejoras tecnológicas significativas. Landsat 4 y 5 introdujeron el sensor *Thematic Mapper*, que ofrecía una mayor resolución espacial y la capacidad de capturar imágenes en más bandas espectrales. Recientemente, Landsat 8 y 9, lanzados en 2013 y 2021 respectivamente, han mejorado aún más la calidad de las imágenes, la precisión de los datos y la frecuencia de captura. La serie Landsat ha sido el principal soporte de la teleobservación de recursos terrestre enfocada a aplicaciones civiles, permitiendo el desarrollo de nuevos conocimientos científicos, aplicaciones y tecnologías innovadoras (Di Leo, N., 2023).

Tabla 1: *Periodo en funcionamiento, bandas y resolución de Landsat. (*Fallo en lanzamiento). Fuente: Elaboración propia.*

Periodo de funcionamiento	Satélite	Bandas	Resolución
1972 – 1978	Landsat 1	4	79 m.
1975 – 1982	Landsat 2	4	79 m.
1978 – 1983	Landsat 3	4	79 m.
1982 – 1993	Landsat 4	7	30 m.
1984 – 2013	Landsat 5	7	30 m.
1993*	Landsat 6	8	30 m.
1999 – presente	Landsat 7	8	30 m.
2013 – presente	Landsat 8	11	30 m.
2021 – presente	Landsat 9	11	30 m.

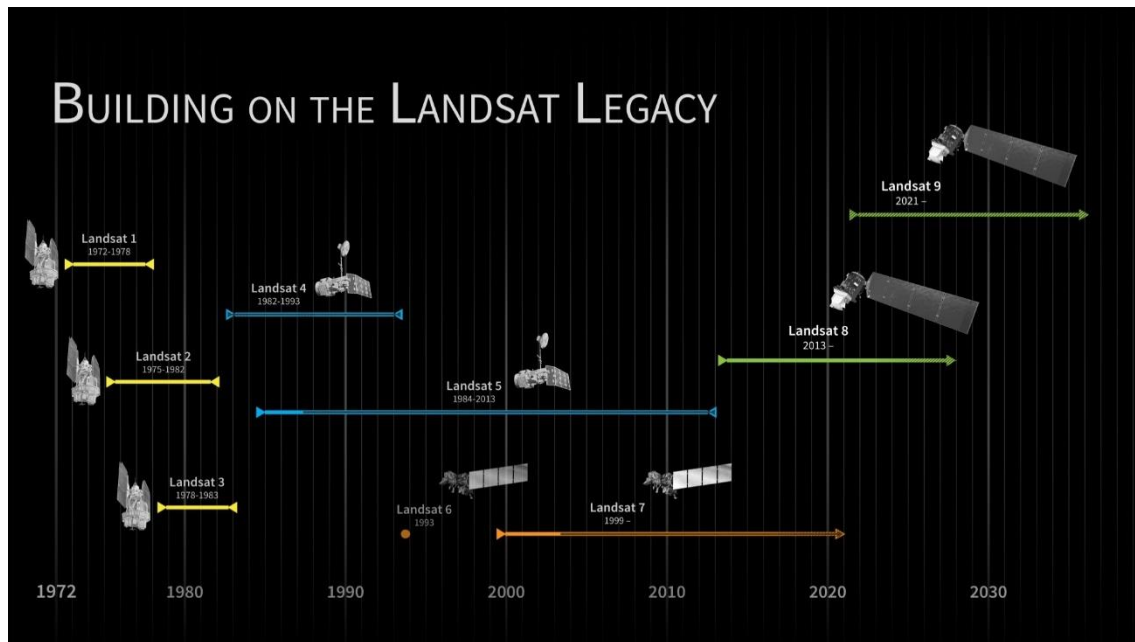


Figura 2: Periodo de funcionamiento e imagen de cada misión Landsat. Fuente: NASA.

De esta manera, la teledetección se entiende como una herramienta de gran valor en la detección de cambios en la superficie terrestre, incluido los cambios en la cobertura. Entre las grandes ventajas que ofrece la teledetección se encuentra su capacidad de cuantificar los cambios detectados en la superficie a través de numerosos índices y estadísticos desarrollados en los últimos años. De esta manera, la teledetección se posiciona como una herramienta clave revolucionaria en la forma en la cual estudiamos y gestionamos nuestro entorno. La cobertura vegetal, la temperatura del suelo o los cambios en el uso del suelo son algunas de las variables críticas que es posible monitorear. Los Sistemas de Información Geográfica, por su parte, permiten almacenar, analizar y visualizar estos datos, facilitando la toma de decisiones y el diseño de políticas ambientales (Chuvieco, 2010). Estos últimos han sufrido también un fuerte desarrollo en los últimos años, permitiendo llevar a cabo tareas mucho más complejas y resultando, por tanto, cada vez de mayor utilidad para analizar diversos aspectos ambientales.

Por ello, a lo largo de las últimas décadas, la teledetección ha demostrado ser fundamental en el estudio y gestión de aspectos ambientales de diversa índole, como la conservación de recursos naturales, la monitorización de cambios climáticos, la evaluación de desastres naturales y la conservación de la biodiversidad. Diferentes autores han llevado a cabo estudios de este carácter, como la recuperación de la cubierta forestal después de un incendio (Pedro Martín Ortiz, 2023), la evolución natural de la cobertura del suelo y vegetación en una zona de olivar (Cristian Rodríguez

Romero, 2021) o el análisis multitemporal del recubrimiento vegetal en la Comarca del Matarraña (Sergio Romero Cabezado, 2019). Con todos estos estudios se demuestra la gran utilidad que tiene hoy en día el uso de la teledetección y que esta disciplina está relacionada en gran medida con las Ciencias Ambientales, siendo una herramienta fundamental en el día a día para un ambientólogo.

Dentro de las múltiples aplicaciones de la teledetección, el monitoreo de la vegetación es uno de los campos más destacados. La vegetación juega un papel crucial en el equilibrio ecológico, influenciando en el clima, el ciclo del agua y la biodiversidad. Los cambios en la cubierta vegetal pueden ser un signo de variaciones climáticas, prácticas en el uso del suelo, desastres naturales o factores antropogénicos. Es por tanto crucial el seguimiento y análisis de estos cambios a través de la teledetección para ser capaces de anteponernos a posibles escenarios de futuro en los que lograr una gestión sostenible de los recursos naturales y una óptima planificación ambiental.

1.2. Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Se entiende por SIG el conjunto integrado de herramientas y tecnologías utilizadas para capturar, almacenar, analizar, gestionar y presentar datos geográficamente referenciados. Un SIG permite visualizar, comprender e interpretar los resultados. El desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) comenzó en la década de 1960 con la aparición de los ordenadores y la geografía cuantitativa. En 1963, Roger Tomlinson creó el primer SIG informatizado del mundo, el Sistema Canadiense de Información Geográfica, con el propósito de gestionar los recursos naturales de Canadá mediante la fusión de datos de diferentes provincias.

En 1965, se fundó el Laboratorio de Harvard para Gráficos por Computadora, donde se desarrollaron algunos de los primeros programas de cartografía informatizada. Este laboratorio se convirtió en un centro de investigación clave para el análisis espacial y la visualización. Años más tarde, en 1969, se fundó en este laboratorio Esri, aplicando la cartografía informatizada y el análisis espacial para resolver problemas de planificación del uso del suelo. En 1981 Esri lanzó ARC/INFO, el primer producto comercial de SIG, marcando el comienzo de la comercialización y expansión de los SIG. A través de esta vía, Esri ha continuado innovando y desarrollando las herramientas utilizadas en los SIG, brindando una amplia variedad de aplicaciones. Los componentes en los cuales se clasifica un SIG se muestran en la **figura 3**.

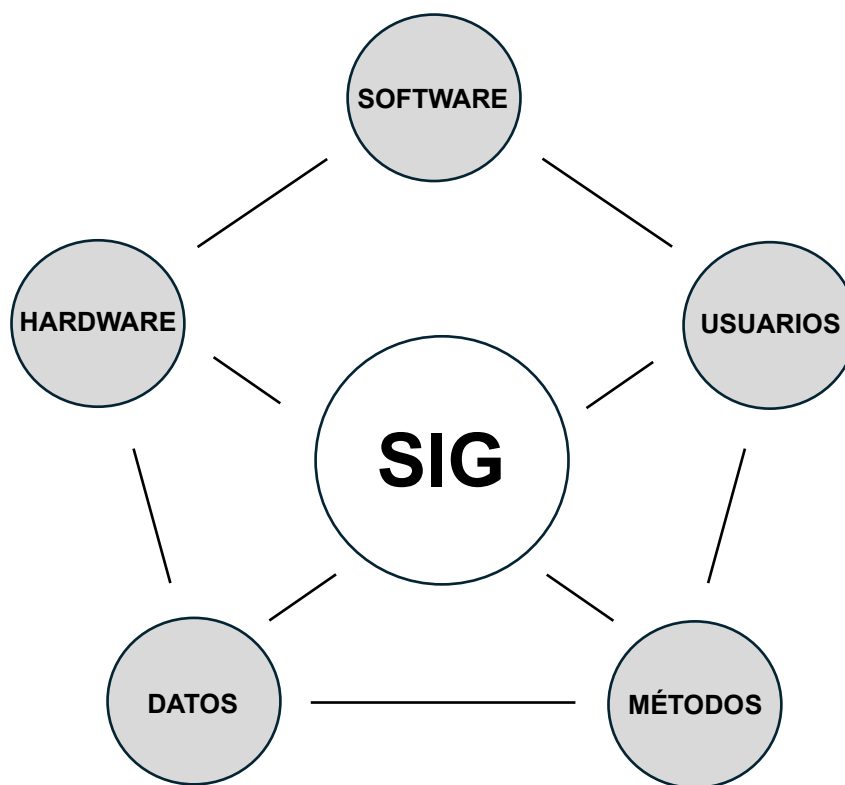


Figura 3: Componentes de un SIG. Fuente. Elaboración propia.

1.3. CORINE Land Cover (CLC)

Para el estudio de la cobertura vegetal en el área de estudio, el municipio de Fiscal, se ha decidido utilizar los productos geoespaciales proporcionados por el programa Corine Land Cover (CLC). Estos productos son diseñados para facilitar el análisis y la interpretación de la cobertura del suelo y su uso a nivel europeo en diferentes años. El CLC es un conjunto de datos promovido por la Comisión Europea a principios de la década de 1980 sobre la cubierta terrestre y el uso del suelo en el continente europeo. Este programa ofrece un inventario de la cubierta vegetal y el uso del suelo con 44 clases temáticas. Cada una de estas clases pertenece a un tipo distinto de uso de suelo. La información es actualizada cada 6 años, 1990 el primer año del cual se tiene acceso a esta información, y 2018 el año con la actualización de datos más reciente. Además, en este trabajo se ha hecho uso de imágenes multispectrales obtenidas a través del portal Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, sigla en inglés). Estas imágenes son capturadas por sensores remotos que registran datos en múltiples bandas del espectro electromagnético. Concretamente, se ha trabajado con

las imágenes multiespectrales proporcionadas por los satélites Landsat 5 y Landsat 8. Las imágenes de Landsat son idóneas para realizar estudios a escala multitemporal por la disponibilidad de registros antiguos, y por la frecuencia de revisitación, que en el caso de ambos satélites es de 16 días.

1.4. Índices espectrales

Las imágenes multiespectrales permiten obtener los índices espectrales para el área y época de estudio. Estos índices son fórmulas matemáticas que utilizan bandas específicas del espectro electromagnético para resaltar ciertas características de la vegetación. Uno de los índices más conocidos y utilizados para medir la cobertura vegetal es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), capaz de medir la densidad y el vigor de la vegetación. En este trabajo se han estudiado ocho índices espectrales, incluido el mencionado NDVI, para observar cual es el que mejor representa los cambios en la vegetación y las particularidades de cada uno en lo que se refiere a la cubierta vegetal de Fiscal a lo largo de estos últimos 30 años, realizándose de esta manera un estudio multitemporal con imágenes multiespectrales de satélite. También pretende ser una contribución al campo académico, proporcionando una evaluación detallada de la efectividad de diferentes índices espectrales en la detección de cambios en la cubierta vegetal, contribuyendo al desarrollo de metodologías más precisas y eficientes para el monitoreo ambiental. Dicho monitoreo es aplicado en una región específica, Fiscal, ofreciendo un caso de estudio concreto que puede ser comparado en otras regiones y contextos geográficos similares, ayudando a optimizar las técnicas de teledetección. Esta investigación, además, aporta datos específicos sobre los cambios en la vegetación de Fiscal, región poco estudiada en este contexto. Los resultados y métodos desarrollados en este estudio pueden inspirar futuras investigaciones en otras regiones o en otros aspectos de la teledetección y la ecología, además de servir como base de datos para estudios más detallados o a mayor escala.

2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es evaluar la capacidad de detección de cambios en la cubierta vegetal por parte de los principales índices espectrales utilizados en teledetección óptica.

Los objetivos específicos (OE) son:

- OE 1: Obtener las principales categorías de cobertura vegetal para los años 1990 y 2018 y el área de estudio, municipio de Fiscal (Huesca).
- OE 2: Obtener imágenes multiespectrales en determinadas estaciones (invierno y verano), en los años y área de estudio.
- OE 3: Estimar los principales índices espectrales en la teledetección óptica en relación a la cobertura vegetal a partir de las imágenes obtenidas.
- OE 4: Estimar los principales estadísticos de los índices espectrales para las principales categorías de la cobertura vegetal en los años, épocas y el área de estudio.
- OE 5: Evaluar los índices espectrales en función de los estadísticos seleccionados, en cada una de las categorías establecidas para la estación, años y área de estudio.

3. Área de estudio

El área de estudio seleccionada para la realización del trabajo es el término municipal de Fiscal, ubicado en la provincia de Huesca, al norte de España. La razón por la cual se ha escogido esta región se debe a su posición geográfica. Situado dentro del Pirineo, concretamente en el oeste de la comarca del Sobrarbe, posee una gran riqueza en términos paisajísticos y de biodiversidad.

Fiscal está situado al noroeste de la provincia de Huesca (**figura 4**). Con una superficie de 17.006 ha. y limitando al norte con el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido, le confiere una proximidad privilegiada a uno de los espacios naturales más importantes de los Pirineos. Lo más característico de la zona es, además de esta proximidad al Parque Nacional, la gran presencia de bosques y vegetación, y una gran biodiversidad en términos de fauna.

En términos topográficos, se caracteriza por ubicarse dentro de un entorno montañoso y accidentado propio de los Pirineos, con una gran diversidad de elementos geográficos que definen su territorio. Posee un relieve montañoso, con altitudes que varían significativamente en la mayoría del territorio. Las elevaciones oscilan entre los 700 y 2000 m., desde los valles hasta las cumbres de las montañas que ocupan la región (**figura 6**). Concretamente, la altitud media del área de estudio es de 1058 m., corroborando la gran altitud que presenta el término municipal. La cumbre más alta que conforma Fiscal es el Suerio, con 1954 m. Esta zona presenta un gran desnivel

altitudinal, con elevados valores de altitud al norte y sur, y cotas más bajas en el centro de dicho municipio, lo que lleva a una gran variedad de orientaciones (**anexo 29**) y elevados valores de pendiente (**anexo 30**).

El clima de Fiscal, en líneas generales, es de tipo montañoso, con inviernos fríos y veranos suaves (**anexo 31**). Según la clasificación climática de Köppen, la mayor parte del territorio posee un clima oceánico templado (Cfb), con inviernos suaves e inviernos frescos. En regiones de menor altitud, es decir, aquellas que se ubican a los márgenes del río Ara, poseen un clima subtropical húmedo (Cfa), donde los veranos son más cálidos y húmedos. Finalmente, en las regiones de mayor altitud, se presenta un clima continental húmedo (Dfb), con inviernos fríos y veranos templados.

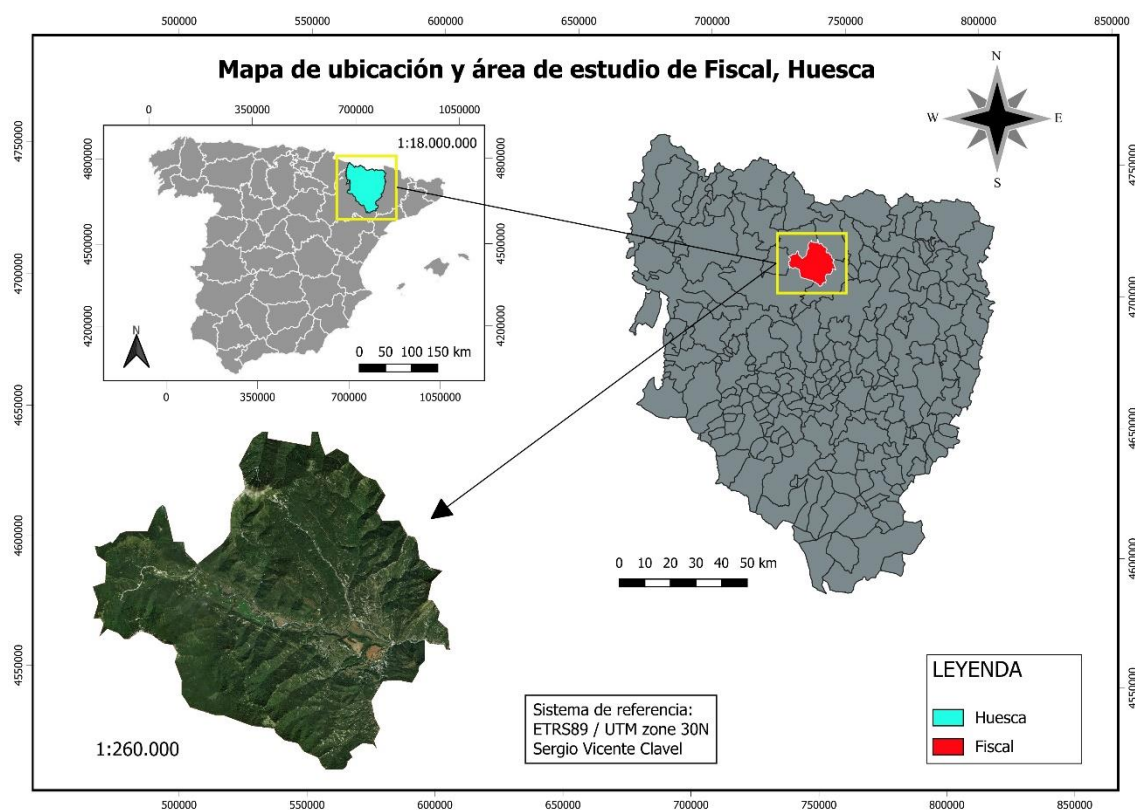


Figura 4: Mapa de localización del municipio de Fiscal. *Elaboración propia.*

Las precipitaciones en el área de estudio son abundantes y se distribuyen generosamente durante todo el año, aunque las estaciones con mayores registros de precipitación suelen ser otoño e invierno, con nevadas frecuentes durante esta última estación en las cotas más altas. Al poseer una gran variación altitudinal y heterogeneidad en la orientación de las laderas, el clima puede cambiar en determinados puntos del área de estudio, afectando directamente a la distribución de la

vegetación y la fauna. Las precipitaciones suelen ser superiores a los 1000 mm por año (figura 5).

En el presente trabajo se ha comprobado que los valores de precipitación total de los años de estudio, 1990 y 2018, en el municipio de Fiscal, se localizan dentro del rango normal, es decir, que no son valores de precipitación extremos, y están dentro de los percentiles 10 y 90 (892 y 1429 mm., respectivamente) (Instituto Geográfico de Aragón, Atlas Climático de Aragón).

En cuanto a la vegetación, las especies que integran el ecosistema son principalmente el haya común (*Fagus sylvatica*), el pino albar (*Pinus sylvestris*) y el roble peloso (*Quercus pubescens*).

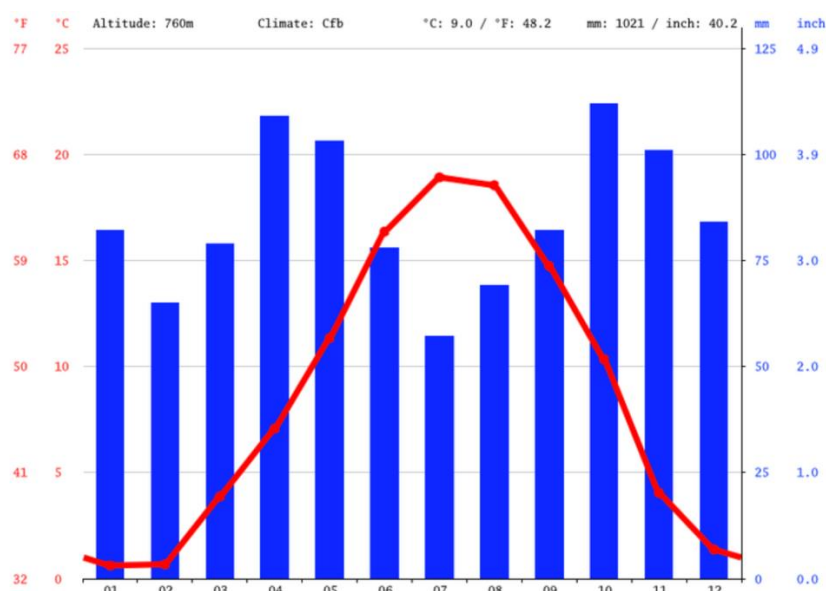


Figura 5: Climograma de Fiscal, precipitación (mm) en color azul, y temperatura media (°C, °F) en color rojo. Fuente de información: Climate-Data.org.

La hidrología de Fiscal destaca por el río Ara, uno de los más importantes del pirineo aragonés. El río Ara es uno de ríos con régimen fluvial mejor conservados, siendo uno de los pocos ríos sin regular que existen a día de hoy, tras haberse desestimado el proyecto de la construcción de la presa de Jánovas en 2001.

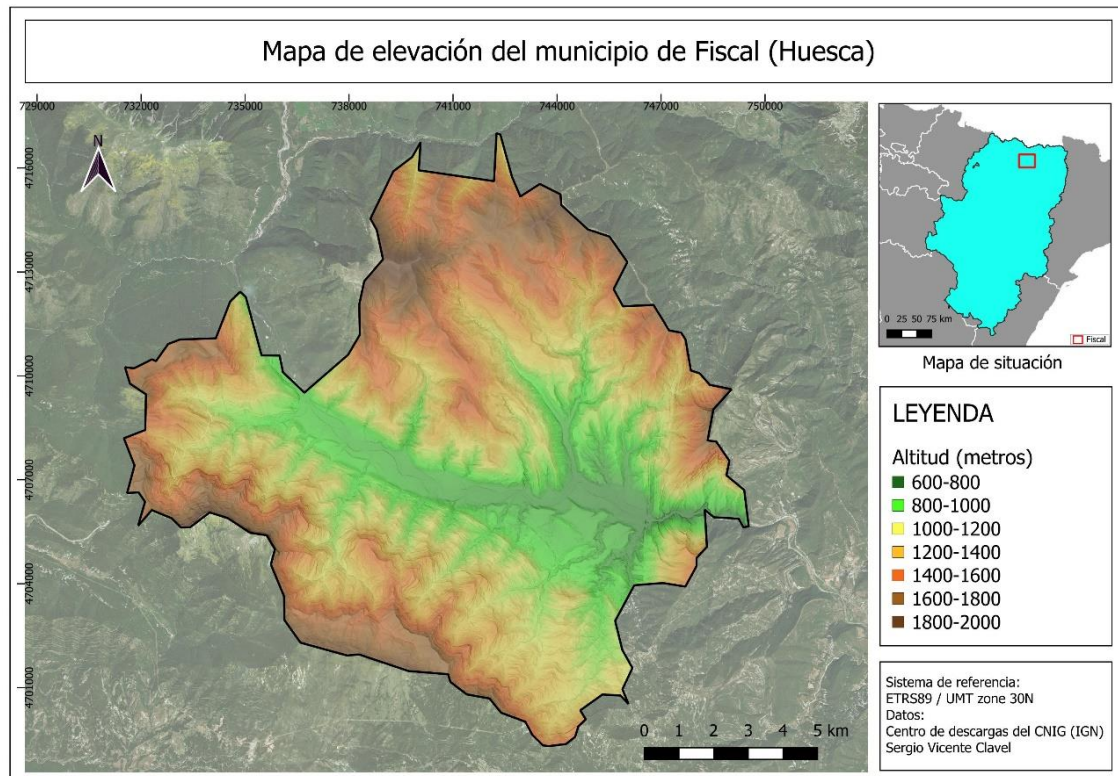


Figura 6: Mapa de elevación del municipio de Fiscal. Elaboración propia.

4. Material y métodos

El primer paso en este trabajo ha sido determinar el lugar y el momento de estudio. En este sentido, se ha optado por un área de montaña en el territorio español, en donde la dinámica fluvial ha estado poco condicionada por la acción del hombre. Además, se ha escogido el año 1990 y 2018, como representación de la cobertura pasado, y reciente, en donde se dispone de diferentes fuentes de información sobre la cobertura del suelo. A su vez, se han seleccionado dos periodos distintos dentro del mismo año con un comportamiento distinto en la vegetación, invierno (enero) y verano (julio), para observar los cambios producidos entre estaciones.

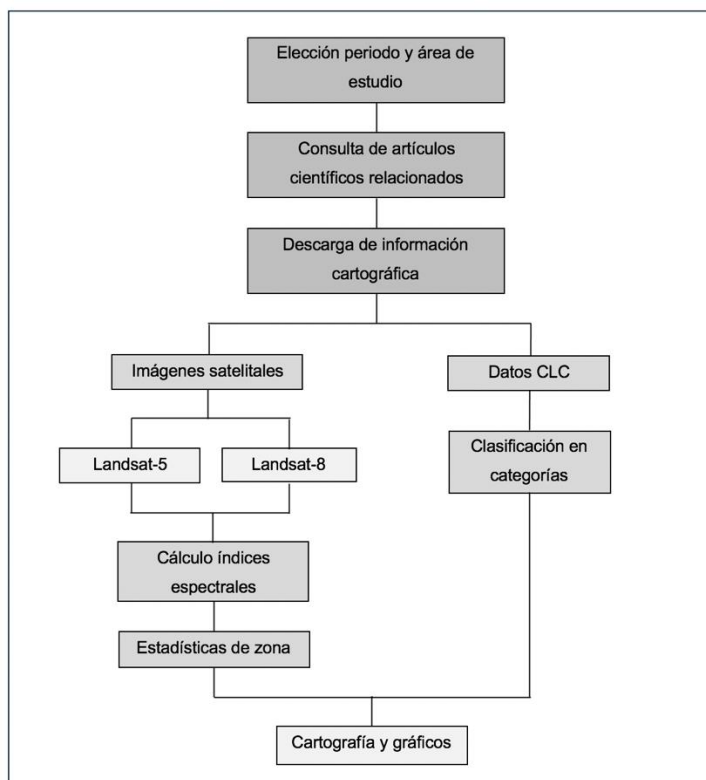


Figura 7: Cuadro-resumen de la metodología adoptada para la realización del trabajo. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se ha realizado una recopilación de los datos a partir de diferentes fuentes de información. Se realiza un tratamiento de los mismos, así como un análisis estadístico, que permite obtener diferentes resultados en función de los objetivos definidos. Estos resultados han sido representados en gráficos y mapas, y se interpretaron según los objetivos mencionados. El análisis estadístico y la representación gráfica se ha realizado con el programa informático QGIS, y las hojas de cálculo de Excel.

De manera paralela, a lo largo del desarrollo del trabajo, se han consultado numerosas fuentes de información para profundizar en el tema de estudio, herramientas de trabajo, y conocimiento de las características geográficas del área de estudio, mediante artículos científicos y trabajos fin de grado, entre otros. Esto permite una mejor comprensión y aproximación al tema de estudio, para comprender cuales son los factores que influyen en los cambios en la vegetación y como gracias al uso de la teledetección pueden ser detectados.

4.1. Obtención de las principales categorías de cobertura vegetal para los años 1990 y 2018 en el municipio de Fiscal

Las diferentes coberturas de vegetación se han obtenido a partir de la información proporcionada por el programa Corine Land Cover (CLC). Este dispone de información de usos del suelo cada 6 años, siendo el año 1990 el primero del cual se tiene acceso a esta información, y 2018 la actualización más reciente. Estos son los años en los cuales se ha llevado a cabo el estudio. Los capas espaciales del CLC se obtienen del Instituto Geográfico Nacional del Gobierno de España (CNIG). El CLC resulta de gran utilidad para nuestro estudio, ya que es capaz de elaborar polígonos con la clase temática específica en la cual se divide el territorio, haciendo posible trabajar posteriormente con estos datos con esta información a través del Sistema de Información Geográfico de manera óptima. Por el contrario, uno de los inconvenientes de trabajar con estos datos es que no es posible diferenciar entre estaciones, por lo tanto, las clases temáticas en las cuales se divide la información puede sufrir modificaciones en función de la época del año en la que nos encontremos.

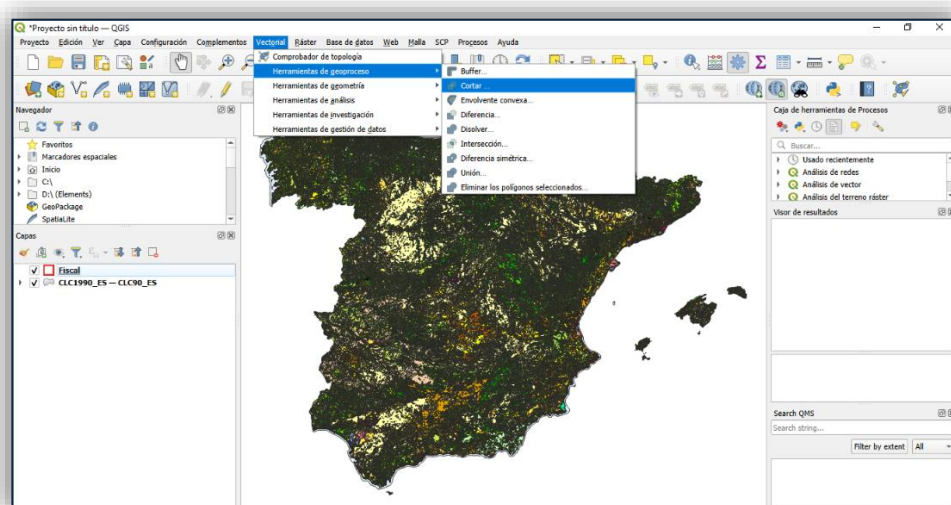


Figura 8: Ejemplo de recorte de una capa vectorial al área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Una vez realizada la descarga de los usos del suelo del CLC para España en los años de estudio, se obtiene la información para el área de trabajo, a partir de la función “cortar” del programa QGIS (**figura 8**). A continuación, se ha realizado una reclasificación de los usos del suelo para obtener las principales coberturas de vegetación, según la extensión de las mismas, y la similitud entre los años de estudio. La reclasificación se ha realizado en la tabla de atributos de la capa espacial, a través

de la creación de una nueva columna y la calculadora de campo (ejemplo de código, `WHEN "CODE_90" >= 211 AND "CODE_90" <= 243 THEN 'A' ELSE ''`), dentro del programa QGIS. Esta reclasificación de los usos del suelo permite realizar una comparación de los cambios ocurridos de manera visual. Las clases temáticas del CLC se han reclasificado en: zona A, correspondiente a agricultura de cultivos, zona B, correspondiente a bosques, y zona C, correspondiente a vegetación arbustiva y/o herbácea (**Tabla 2**).

Tabla 2: Clasificación de las categorías del CORINE Land Cover. Fuente: Elaboración propia.

Clasificación CLC	ID	CLASE	ZONA
Tierras de labor en secano	211	AGRICULTURA DE CULTIVOS	A
Terrenos regados permanentemente	212		
Praderas	231		
Mosaico de cultivos	242		
Terrenos agrícolas con vegetación natural	243		
Bosques de frondosas	311	BOSQUES	B
Bosques de coníferas	312		
Bosque mixto	313		
Pastizales naturales	321	VEGETACIÓN ARBUSTIVA Y/O HERBÁCEA	C
Landas y matorrales	322		
Vegetación esclerófila	323		
Matorral boscoso de transición	324		

Finalmente, el resultado obtenido es el mapa del área de estudio con las 3 clases temáticas (agricultura de cultivos, bosques y vegetación arbustiva y/o herbácea) representadas de 3 colores distintos (**figura 9**). Los polígonos que aparecen representados en color blanco corresponden con aquellas clases temáticas que representan una extensión muy pequeña en el mapa pero que no podemos despreciar para realizar la comparación entre ambos años. Por último, en cada año de estudio se ha obtenido el porcentaje de superficie ocupada por las clases obtenidas de la reclasificación del CLC. Esto permite conocer cómo ha cambiado las coberturas de vegetación a lo largo de 29 años (1990 y 2018).

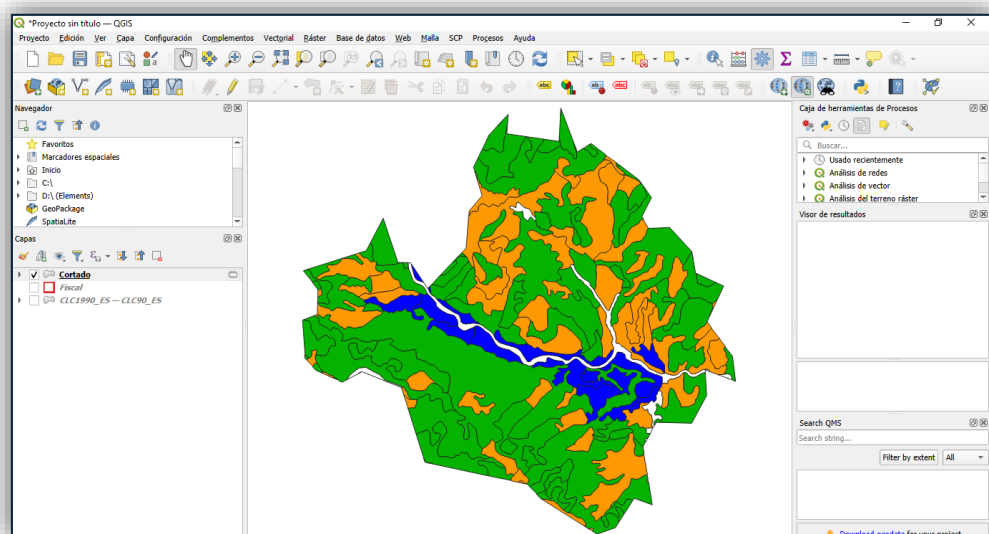


Figura 9: Ejemplo del mapa final con las categorías del CLC. Fuente: Elaboración propia.

4.2. Obtención de imágenes multiespectrales en enero y julio de 1990 y 2018 en el municipio de Fiscal

Las imágenes multiespectrales de satélite han sido obtenidas a través del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), mediante su portal de libre acceso (EarthExplorer, n.d.). Las imágenes se han descargado según la capa espacial del municipio de Fiscal y el filtro temporal, enero (invierno) y julio (verano) de los años 1990 y 2018. En la descarga de las imágenes de 1990, se ha seleccionado el satélite Landsat 5, mientras que para las del año 2018, el satélite seleccionado ha sido Landsat 8. Esta decisión es debida a que, en el año 1990, Landsat 5 era el satélite más avanzado a partir del cual se podían obtener imágenes satelitales con una buena resolución espacial, mientras que, en el año 2018, el satélite Landsat 8 era la mejor opción (ver **figura 2**). Ambos satélites comparten la misma resolución espacial, 30 m., por lo que no ha sido necesario aplicar un remuestreo en dichas imágenes. La frecuencia temporal de captura de imágenes del mismo punto de ambos satélites es de 16 días, por lo que para cada mes existen 2 imágenes disponibles. Esto permite seleccionar la imagen que presenta menor presencia de nubes, aspecto a tener en cuenta para el análisis de la cubierta terrestre. En el caso de las imágenes descargadas no existe apenas porcentaje de nubes en todo el territorio, a excepción de la imagen de 2018 al sur del área de estudio, donde puede apreciarse una ligera nubosidad.

Las imágenes resultantes pertenecen a los satélites Landsat 5 y 8, con los respectivos sensores *Thematic Mapper* (TM) y *Operational Land Imager* (OLI). Se ha

valorado la utilización de imágenes procedentes del satélite Sentinel 2, pero esta opción ha sido finalmente rechazada debido a la diferencia en la resolución espacial entre Sentinel 2 y Landsat 5 y 8. Además, como se ha visto en muchos estudios ya realizados, las imágenes de Landsat son ideales para la realización de estudios multitemporales por su mayor longitud temporal de los registros.

Tabla 3: Fecha y nombre de las imágenes satelitales utilizadas. Fuente: Elaboración propia.

1990	25/01/1990	LT05_L2SP_199031_19900125_20200916_02_T1	Landsat 5
	20/07/1990	LT05_L2SP_199031_19900720_20200915_02_T1	
2018	22/01/2018	LC08_L2SP_199031_20180122_20200902_02_T1	Landsat 8
	17/07/2018	LC08_L2SP_199031_20180717_20200831_02_T1	

Se han tenido en cuenta algunas propias características de estas imágenes como el *Path* (199) y *Row* (031), que sirven como sistema de referencia para identificar el punto exacto en el cual las imágenes son capturas por los satélites, sirviendo de especial relevancia de cada a que las imágenes sean iguales píxel a píxel.

A continuación, en cada imagen se han seleccionado las bandas necesarias para el trabajo, las cuales dependen de los índices espectrales con los que se trabaje. Cada índice espectral requiere de unas bandas espectrales concretas para llevar a cabo la expresión matemática correspondiente. En el presente trabajo se ha utilizado de la banda 1 a la 5 para el satélite Landsat 5, y la banda 1 a la 6 para el satélite Landsat 8 (tabla 4).

Tabla 4: Bandas espectrales de Landsat 5 (TM) y Landsat 8 (OLI). Fuente: Elaboración propia.

Landsat 5 TM (μm)			Landsat 8 OLI (μm)		
Banda 1	Azul	0,45 – 0,52	Banda 1	Costero	0,43 – 0,45
Banda 2	Verde	0,52 – 0,60	Banda 2	Azul	0,45 – 0,51
Banda 3	Rojo	0,63 – 0,69	Banda 3	Verde	0,53 – 0,59
Banda 4	NIR	0,76 – 0,90	Banda 4	Rojo	0,64 – 0,67
Banda 5	SWIR-1	1,55 – 1,75	Banda 5	NIR	0,85 – 0,88
			Banda 6	SWIR-1	1,57 – 1,65

4.3. Estimación de los principales índices espectrales en la teledetección óptica en relación a la cobertura vegetal a partir de las imágenes obtenidas

La revisión bibliográfica de los cambios en la cobertura vegetal, y los diferentes índices espectrales utilizado para ello, ha permitido realizar una selección de los mismos para los objetivos de este estudio. En este sentido, en el trabajo se estudian 8 índices espectrales (ARVI, BSI, GCI, GNDVI, MSI, NDMI, NDVI, SAVI), los cuales informan de características específicas del terreno o la vegetación (**ver tabla 5**).

Cada uno de los índices espectrales involucra diferentes bandas, el rango de interpretación de estos suele ser similar, pero no siempre es el mismo. En general, los valores positivos indican una mayor densidad de vegetación y biomasa vegetal, a excepción del índice BSI y MSI. En el caso del BSI, sus valores positivos indican áreas con suelo desnudo y los negativos áreas con cobertura de vegetación natural. El MSI muestra una mayor humedad para valores cercanos a 0, mientras que los valores cercanos a 2 indican menor humedad.

Tabla 5: Bandas espectrales según el satélite utilizado e índice espectral requerido. (*+ veg, hum: mayor presencia de vegetación y humedad). Fuente: Elaboración propia.

Nº	Abr.	Índice espectral	Descripción	Landsat 5	Landsat 8	Rango	Fórmula
1	ARVI	Atmospherically Resistant Vegetation Index	Reduce la influencia de factores atmosféricos.	B1, B3, B4	B2, B4, B5	-1 a 1 (+ veg.)	$\frac{NIR - (2 \times Red - Blue)}{NIR + (2 \times Red - Blue)}$
2	BSI	Bare Soil Index	Evalúa la erosión del suelo.	B1, B3, B4, B5	B2, B4, B5, B6	-1 (+ veg.) a 1	$\frac{(SWIR + Red) - (NIR + Blue)}{(SWIR + Red) + (NIR + Blue)}$
3	GCI	Green Coverage Index	Estima el contenido de clorofila y el estado fenológico y sanitario de la vegetación.	B2, B4	B3, B5	0 a 1 (+ veg.)	$\frac{NIR}{Green} - 1$
4	GNDVI	Green Normalized Difference Vegetation Index	Similar al NDVI, pero más sensible a la variación del contenido de clorofila.	B2, B4	B3, B5	-1 a 1 (+veg.)	$\frac{(NIR - Green)}{(NIR + Green)}$
5	MSI	Moisture Stress Index	Análisis del estrés hídrico en la vegetación.	B4, B5	B5, B6	0 (+ hum.) a 2	$\frac{SWIR}{NIR}$
6	NDMI	Normalized Difference Moisture Index	Determina el contenido de agua y humedad en la vegetación.	B4, B5	B5, B6	-1 a 1 (+ veg.)	$\frac{(NIR - SWIR)}{(NIR + SWIR)}$
7	NDVI	Normalized Difference Vegetation Index	Evalúa la densidad y salud de la vegetación.	B3, B4	B4, B5	-1 a 1 (+ veg.)	$\frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)}$
8	SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index	Variante del NDVI que incorpora un factor de corrección para suelos expuestos.	B3, B4	B4, B5	-1 a 1 (+ veg.)	$\frac{(1 + L) \times (NIR - Red)}{(NIR + Red + L)}$

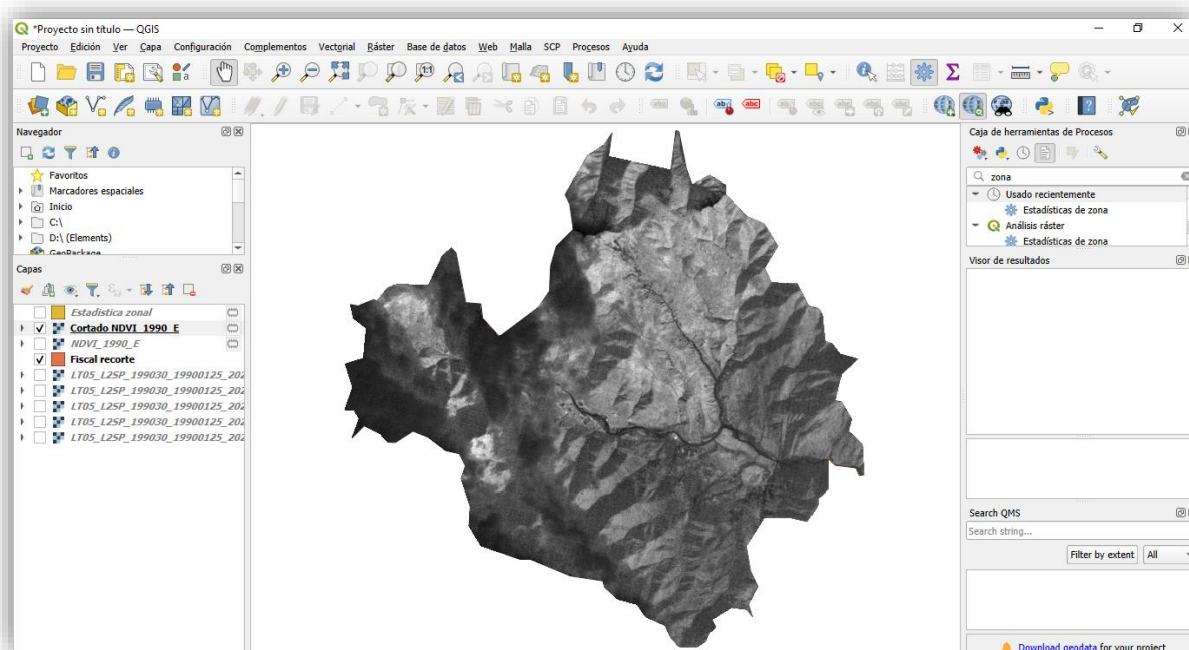


Figura 10: Ejemplo resultado recorte del área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, en el programa “QGIS” se han importado las bandas de cada imagen, se obteniendo el índice espectral a partir de la función “calculadora raster”, en donde se indica la expresión de cada índice espectral. Por ejemplo, para calcular el índice NDVI, la expresión a introducir sería $NIR - Red / NIR + Red$, es decir, para Landsat 5 es $B4 - B3 / B4 + B3$. Una vez obtenido el índice espectral, se realiza un recorte del área de estudio. En esta ocasión al estar trabajando con una capa ráster, el recorte se realiza desde la herramienta “Ráster”, “Extracción”, “Cortar ráster por máscara de capa”. Finalmente, se obtienen 32 capas espaciales, de los 8 índices espectrales en las dos estaciones y para los dos años.

4.4. Estimación los principales estadísticos de los índices espectrales para las principales categorías de la cobertura vegetal en enero y julio de 1990 y 2018 en el municipio de Fiscal

Una vez calculados todos los índices espectrales, se ha ejecutado el proceso denominado “Estadísticas de zona” el cual va a permitir calcular valores estadísticos para cada uno de los índices espectrales según las “zonas” o categorías indicadas. El programa QGIS ofrece diferentes estadísticos (media, desviación típica, recuento, percentiles, etc.), y tras realizar una comparación de los mismos, se ha optado por elegir la media de los valores de los índices en cada una de las categorías indicadas para cada estación y año de estudio. Las categorías utilizadas para aplicar el estadístico

sobre los índices espectrales corresponden a las coberturas de vegetación obtenidas en el proceso de reclasificación (zona A, zona B y zona C). El proceso “Estadísticas de zona” genera valores en la tabla de atributos que posteriormente son importados al programa Excel en formato CSV para el análisis de los estadísticos, suponiendo la utilización de tablas dinámicas para resumir la información por años, meses, índices y categorías.

4.5. Evaluación de los índices espectrales en función de los estadísticos seleccionados, en cada una de las categorías establecidas para la estación, años y área de estudio

El último paso de este estudio consiste en evaluar los índices espectrales en cada una de las categorías establecidas en el CLC para enero y julio de los años 1990 y 2018. En la evaluación, se ha contabilizado como han cambiado las coberturas de vegetación en 29 años, y se ha debatido sobre las posibles causas de este proceso. A continuación, se han comparado los índices espectrales en las dos épocas del año (invierno y verano). Para finalizar, se realiza una última comparación de los diferentes índices espectrales en los años de estudio, analizando las diferencias por categorías y a lo largo del tiempo.

Figura 11: Ejemplo tabla dinámica en Excel. Fuente: Elaboración propia.

3	Promedio de VALUE	MONTH	INDICES	CLASE			
4	YEAR			A	B	C	O
5	1990	ENERO	ARVI	0,058856628	0,069851378	0,072602987	
6	1990	ENERO	BSI	-0,00180826	-0,02057655	-0,01477939	
7	1990	ENERO	GCI	0,219110157	0,208356895	0,242279635	
8	1990	ENERO	GNDVI	0,096761302	0,091126125	0,104277845	
9	1990	ENERO	MSI	0,940121262	0,893583679	0,90271905	
10	1990	ENERO	NDMI	0,03166454	0,057021481	0,052131962	
11	1990	ENERO	NDVI	0,089678594	0,089986951	0,100186997	
12	1990	ENERO	SAVI	0,134515684	0,13497803	0,150277968	
13	1990	JULIO	ARVI	0,227069575	0,276577138	0,220172366	
14	1990	JULIO	BSI	-0,03271292	-0,08394105	-0,04218772	
15	1990	JULIO	GCI	0,791246301	0,831164294	0,728993907	
16	1990	JULIO	GNDVI	0,277783252	0,288798406	0,262327436	
17	1990	JULIO	MSI	0,84704765	0,740679887	0,822542866	
18	1990	JULIO	NDMI	-0,08630562	-0,15103862	-0,10089031	
19	1990	JULIO	NDVI	0,279018698	0,304541055	0,26866625	
20	1990	JULIO	SAVI	0,418520724	0,456802721	0,402992008	
21	2018	ENERO	ARVI	0,08362541	0,133612775	0,141026585	0,062773512
22	2018	ENERO	BSI	0,033756271	-0,03083779	-0,04403712	0,02676299
23	2018	ENERO	GCI	0,438903863	0,451034686	0,528177372	0,395588953
24	2018	ENERO	GNDVI	0,178463031	0,17906201	0,201533456	0,163450007
25	2018	ENERO	MSI	1,007386133	0,844126647	0,794928287	0,961218749
26	2018	ENERO	NDMI	0,002655894	-0,08680015	-0,12236049	-0,02013116
27	2018	ENERO	NDVI	0,151255312	0,175525677	0,193161098	0,140650096
28	2018	ENERO	SAVI	0,226878404	0,263282736	0,288735956	0,21097115
29	2018	JULIO	ARVI	0,275818319	0,280516857	0,25973112	0,206417109
30	2018	JULIO	BSI	-0,04283491	-0,08174644	-0,0676858	-0,0279537
31	2018	JULIO	GCI	0,973270999	0,857484866	0,867336129	0,764532899

Figura 12: Ejemplo tabla de datos incorporados en Excel. Fuente: Elaboración propia.

5. Resultados y discusión

5.1. Cambios en la cobertura vegetal en el periodo de estudio a partir de las categorías de Corine Land Cover (CLC)

El primer apartado de los resultados se centra en el estudio de la cobertura vegetal según las categorías del CLC, con el fin de analizar los cambios producidos desde 1990 a 2018. Como se ha mencionado en el apartado anterior, se ha optado por clasificar las clases temáticas del CLC en 3 zonas: A: agricultura de cultivos, B: bosques y C: vegetación arbustiva y/o herbácea en los años 1990 a 2018 (**tabla 2**).

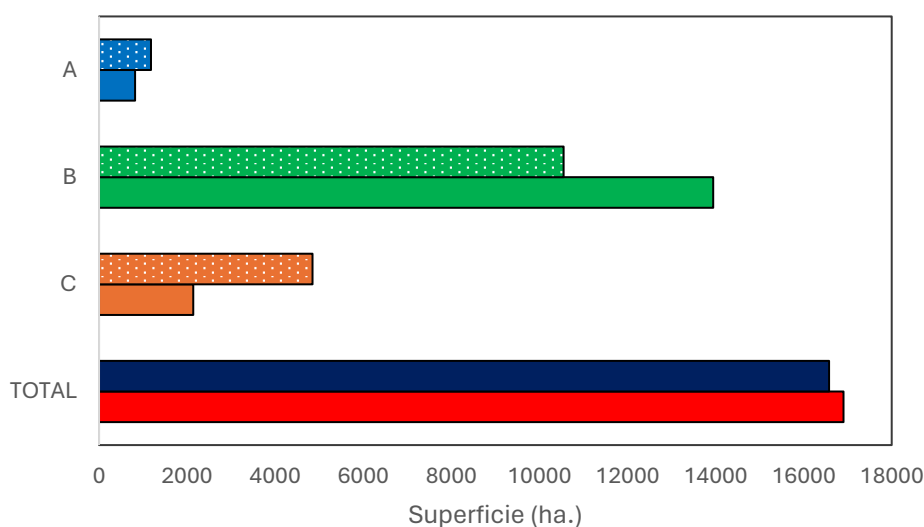


Figura 13: Superficie ocupada por las diferentes cubiertas del suelo (A, B, C) y el total en el municipio de Fiscal en los años 1990 (barra de arriba) y 2018 (barra de abajo). Fuente: Elaboración propia.

Los resultados del presente estudio muestran una clara reducción de la superficie agrícola y de la vegetación arbustiva y/o herbácea, mientras se observa un aumento de la superficie ocupada por bosques (**figura 13**). Esta última ha aumentado casi un 20% (**figura 14**). Por el contrario, se ha producido un descenso del 29 al 12% en la superficie formada por vegetación arbustiva y/o herbácea. Por último, la zona ocupada por la agricultura de cultivos es donde se produce un menor cambio, experimentando una ligera disminución, concretamente del 7 al 4% de la superficie.

Desde el punto de vista espacial (**figura 15**) se puede apreciar como ha variado la cubierta vegetal de Fiscal respecto a las imágenes de 1990 y de 2018. Se observa un aumento de la superficie formada por bosques tanto en la vertiente septentrional como en la meridional. En la imagen de 1990 se contempla una mayor heterogeneidad de la

cubierta vegetal, en especial en la zona norte, donde los bosques y la vegetación arbustiva se repartían la superficie. Esto ha cambiado en 2018, donde puede observarse un gran cambio especialmente en esta zona norte, presentando una mayor homogeneidad compuesta principalmente por bosques.

Este proceso encaja con la idea principal del abandono de la actividad agrícola y ganadera y la tendencia actual del éxodo de las comunidades rurales hacia las grandes áreas metropolitanas como principal factor por el cual se producen cambios en la cobertura del suelo en los últimos años. Lo que en 1990 eran campos de cultivo abandonados, en los siguientes 29 años se ha transformado en áreas cubiertas por bosques, como resultado del cese de la actividad agrícola en la zona. A la vez que destaca la reducción de la vegetación arbustiva y/o herbácea, se puede apreciar el aumento de la superficie ocupada por los bosques. Este aumento se debe a la disminución de la vegetación arbustiva, que ha sido reemplazada por la colonización de árboles y arbustos mayores, lo que ha provocado una transición hacia la categoría de bosques.

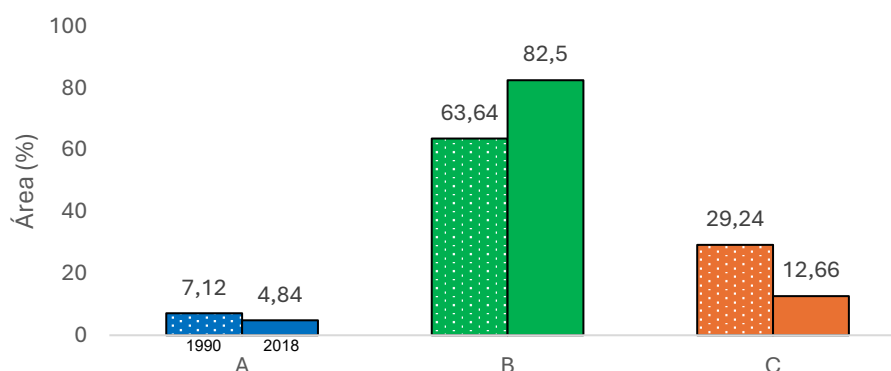


Figura 14: Porcentaje de superficie que representa cada categoría de cubierta vegetal en Fiscal en los años 1990 y 2018. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto la tendencia hacia un incremento de la biomasa vegetal, que coincide con los resultados obtenidos por otros autores que han realizado estudios similares. Lasanta et al., (2000) realizó un estudio en el que se observó como desde mediados del siglo XX se asiste a un proceso generalizado de incremento de la cubierta vegetal, con el avance de la superficie ocupada por matorrales y bosques. Otro estudio similar, Vicente-Serrano et al., 2003, analizó los cambios en la cobertura vegetal a partir del NDVI en zonas del pirineo español, destacando el incremento del abandono de los campos de cultivo y un proceso de revegetación natural. Este abandono genera que las tierras sean colonizadas por especies arbóreas, iniciando un proceso de sucesión ecológica que favorece el crecimiento posterior de los bosques.

Como resultado, el abandono de los espacios agrícolas años atrás, junto con la ausencia o baja presión de pastoreo, ha llevado a una recuperación paulatina de la vegetación natural. (Lasanta, Vicente-Serrano, 2007).

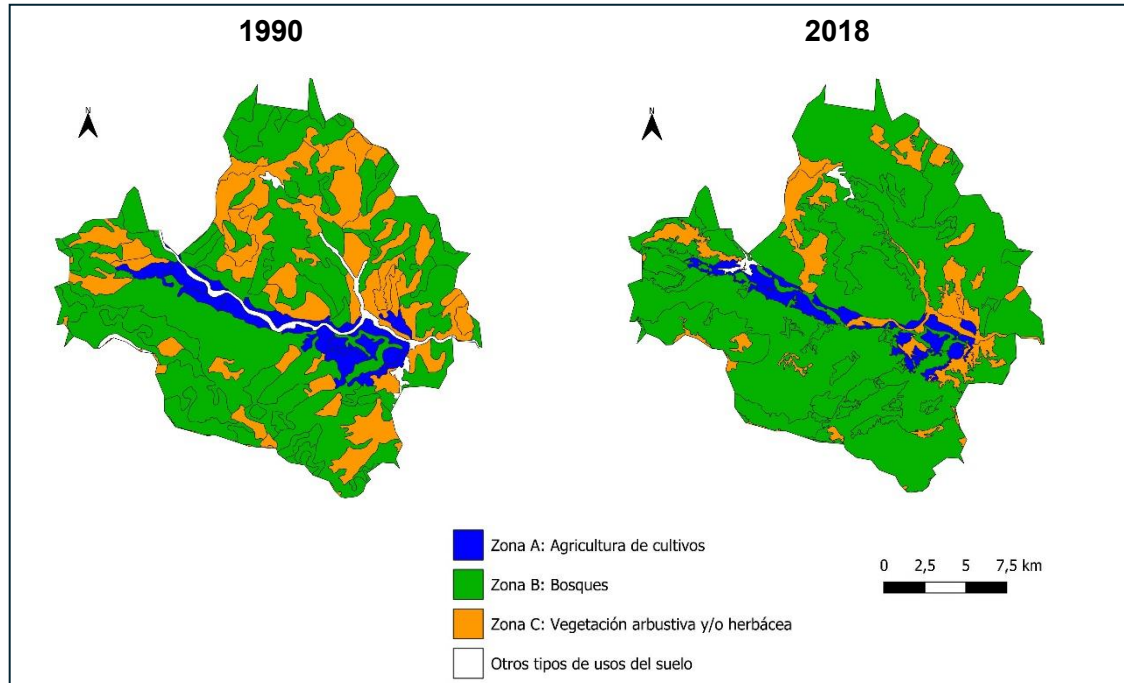


Figura 15: Composiciones CLC por categorías para los años 1990 y 2018 en Fiscal. Fuente: *Elaboración propia.*

Las condiciones climáticas también juegan un papel clave en los cambios producidos en la cubierta vegetal. La temperatura media global se encuentra en un proceso de aumento, registrándose valores medios de temperatura cada vez más altos. Este aumento de temperatura favorece el crecimiento de ciertas especies arbóreas sobre las arbustivas, alterando la composición de la vegetación. Kawata et al. (2001) destacaron que en Europa se está produciendo un incremento de los valores del índice NDVI. Esta tendencia positiva en el NDVI está correlacionada con la temperatura, por lo que queda claro que el incremento térmico es uno de los factores que favorece el proceso de revegetación (Vicente-Serrano et al., 2005).

5.2. Cambios en la cobertura vegetal en el periodo de estudio a partir de los índices espectrales

Para estudiar este apartado, se aborda en primer lugar cómo ha variado la cubierta vegetal observando los índices espectrales de dos estaciones (invierno y verano). En segundo lugar, se realiza una comparación entre los índices espectrales con los valores

medios obtenidos en ambos años para comprobar si existen diferencias notables y determinar que índice espectral es el que mejor refleja los cambios en la cubierta vegetal.

5.2.1. Comparación estacional de los índices espectrales en las cubiertas vegetales en el área de estudio

La **figura 16** muestra la variación estacional de los índices espectrales para el año 1990, y la **figura 17** la misma información para el año 2018. Como es de esperar, la cubierta vegetal en el mes estival es mayor debido a una mayor actividad fotosintética de la vegetación. Más horas de luz, temperaturas más altas o una mayor disponibilidad de agua posibilitan que la vegetación tenga una mayor actividad fotosintética durante este periodo estival. Esto se traduce en una cubierta vegetal más densa y verde, alcanzando máximos en su crecimiento. Por el contrario, durante el periodo invernal, la actividad fotosintética es menor y la cubierta vegetal se ve reducida.

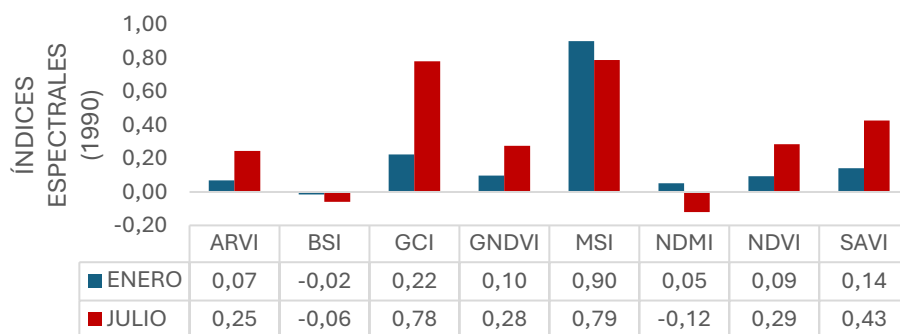


Figura 16: Valores medios de los índices espectrales en enero y julio de 1990 en Fiscal. Fuente: *Elaboración propia.*

Los índices BSI y MSI poseen una particularidad, ya que cuanto menor es el valor que muestran, mayor es la cubierta vegetal. Podemos ver que esta condición se cumple para los dos índices mencionados, mostrando valores más pequeños en el periodo de verano que en el periodo de invierno, por lo que la cubierta vegetal es mayor en verano.

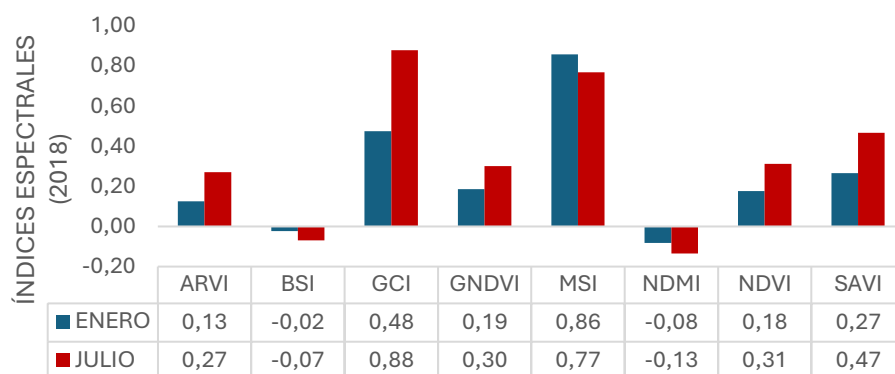


Figura 17: Valores medios de los índices espectrales en enero y julio de 2018 en Fiscal. Fuente: *Elaboración propia.*

5.2.2. Comparación entre los índices espectrales en las cubiertas vegetales en el periodo y área de estudio

En este apartado, se han comparado los índices espectrales con el propósito de encontrar cambios en la cubierta vegetal. En este caso, utilizan los valores de los índices de julio ya que como se ha comprobado en el apartado anterior, ofrece mejores resultados que en el caso de enero (**anexo 24**).

La cartografía resultante de los índices espectrales en julio de 1990 y 2018 muestra diferencias espaciales (**figura 18**). Esta información reflejada muestra una representación en tonos verdosos de los valores de los índices espectrales, de claros a oscuros. Los tonos más claros de este color corresponden al cuartil 1. Esto quiere decir que representan el 25% de los valores más bajos de ese índice espectral. Por el contrario, las zonas que presentan tonalidades más oscuras representan el 25% de los valores más altos del índice espectral (cuartil 4). En general, los valores que indican una mayor actividad vegetal, un menor estrés hídrico, y una menor superficie cubierta de suelo desnudo, coincide con las áreas más elevadas, mientras que los valores que indican una menor actividad vegetal, un mayor estrés hídrico y mayor superficie de suelo desnudo, corresponde con las zonas de menor elevación, es decir, cerca del río Ara. Estas áreas de mayor altitud corresponden con la cobertura de bosque, mientras que en las zonas próximas al río y con valores de elevación más baja predomina los cultivos o zonas herbáceas.

La comparación visual de los índices espectrales en 1990 y 2018 (**figura 18**) resulta difícil, así que, para lograr apreciar mejor los cambios en la cubierta vegetal a través de

los índices espectrales, se ha calculado la media de cada índice espectral según las 3 zonas o categorías definidas en la cobertura vegetal.

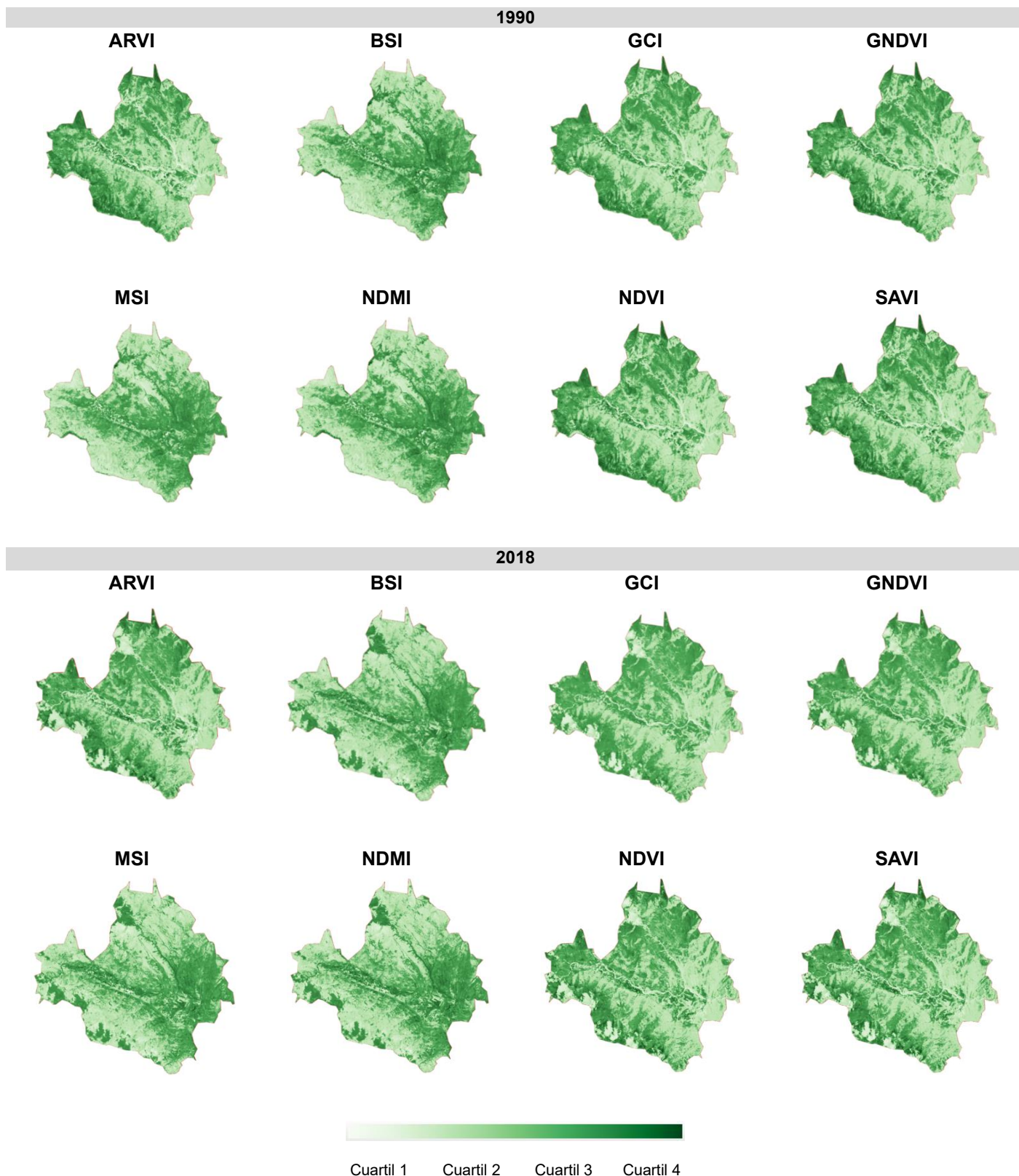


Figura 18: Distribución espacial de los valores de los índices espectrales por cuartiles en julio de 1990 y 2018.

Fuente: Elaboración propia.

El Índice de Vegetación Resistente a la Atmósfera (ARVI), como su propio nombre indica, es una modificación del NDVI diseñado para minimizar el efecto de la atmósfera en las mediciones de la vegetación. El rango de valores generalmente varía entre -1 y 1, donde valores positivos indican presencia de vegetación. En la **figura 20** se aprecian diferencias notables en las 3 categorías de vegetación. En el caso de los bosques, en julio el valor de 1990 y 2018 se mantiene constante, mientras que en el resto aumenta. Se comprueba por tanto la validez del índice ARVI para la detección de cambios en la cubierta vegetal, observándose un aumento de la misma en el periodo de estudio.

El Índice de Suelo Desnudo (BSI) se utiliza para identificar y distinguir el suelo desnudo de otras superficies. Sus valores oscilan entre -1 y 1. Cuanto mayor es el valor, mayor presencia de suelo desnudo y, por tanto, menor presencia de vegetación. Por lo que los valores negativos indican presencia de vegetación y valores positivos escasa vegetación. En la **figura 20** se puede apreciar que se han producido descensos en los valores de todas las categorías de vegetación. La categoría de bosques no ha sufrido cambios en el mes de julio, ya que su valor (-0,08) se mantiene constante. El índice BSI es capaz de mostrar cambios sufridos en la cubierta vegetal en el periodo de estudio, cuantificando la superficie de suelo desnudo. Se ha visto que existía una mayor superficie de suelo desnudo en 1990 frente a 2018. Por esta razón, se puede asegurar que es un índice válido para la detección de cambios en la cubierta vegetal.

El Índice de Clorofila Verde (GCI) mide la cantidad total de clorofila presente en las plantas. Resulta muy útil para la agricultura, ya que es capaz de controlar el estado de los cultivos de forma regular. No posee un intervalo específico en el que se encuentren sus valores, aunque suele oscilar entre 0 y 1 para los valores con altas cantidades de clorofila. En la **figura 20** se observa como el índice GCI muestra valores que aumentan en todas las categorías y meses. Por lo tanto, se determina que es un índice capaz de mostrar cambios en la cubierta vegetal.

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde (GNDVI) es similar al NDVI, pero más sensible a la cantidad de clorofila y densidad de la vegetación, al utilizar la banda verde en lugar de la banda roja. Sus valores varían entre -1 y 1, siendo los valores más altos aquellos que reflejan una mayor densidad y salud vegetal.

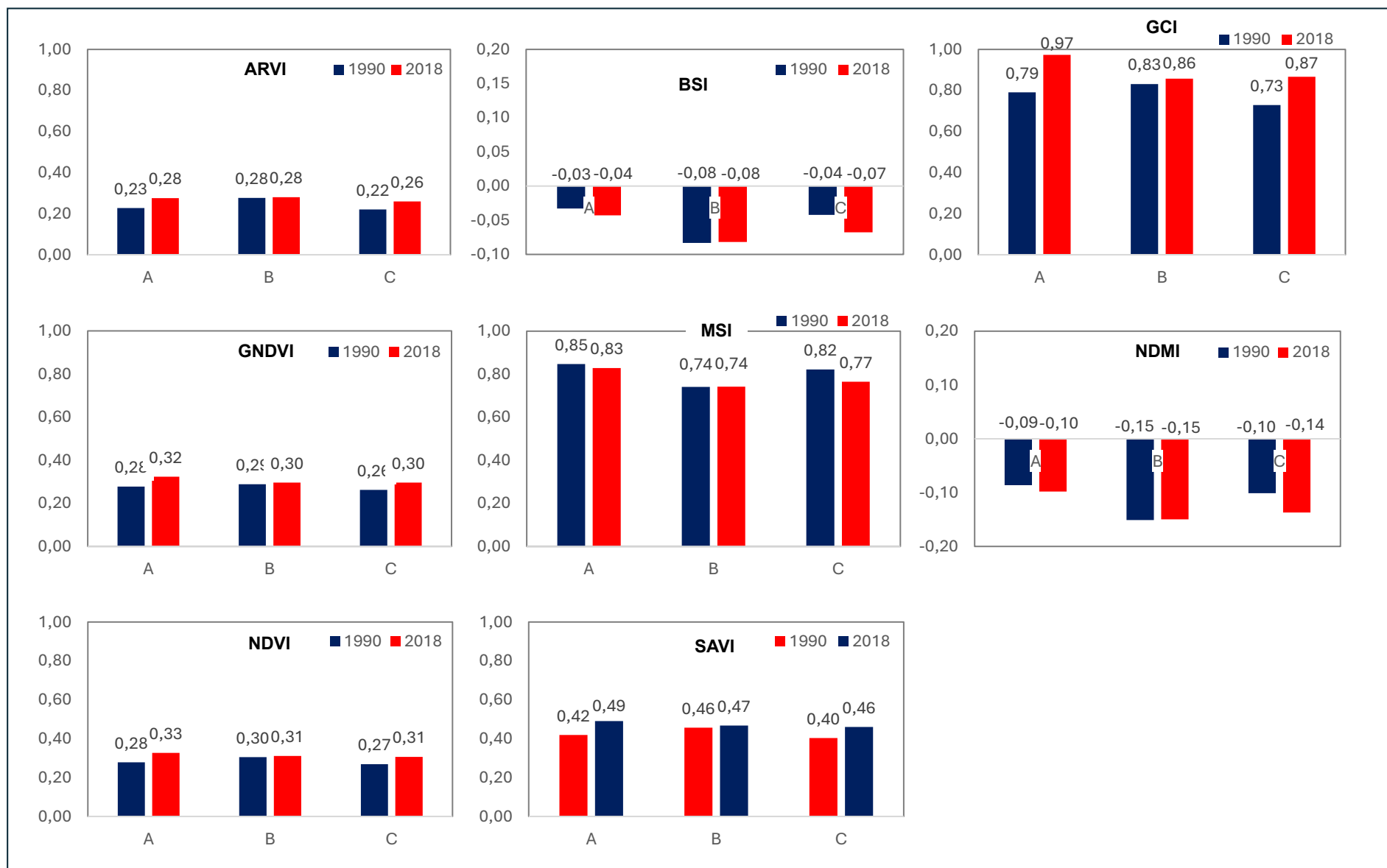


Figura 19: Valores medios de índices espectrales por categoría de julio de 1990 y 2018. Fuente: Elaboración propia.

Los valores del índice GNDVI aumentan en 2018 con respecto a 1990 en las 3 categorías de vegetación. Podemos afirmar que es un índice válido para detectar cambios en la cobertura vegetal en nuestro área de estudio.

El Índice de Estrés Hídrico (MSI) es utilizado para evaluar el contenido de agua en la vegetación. Resulta útil para identificar áreas que están sufriendo estrés hídrico. Los valores oscilan generalmente entre 0 y 2, donde valores más altos indican un mayor estrés hídrico. La **figura 20** muestra como los valores del MSI descienden en todas las categorías de vegetación. El índice MSI puede ser útil para el análisis de los cultivos y aquellos ámbitos relacionados con la agricultura, sin embargo, no se muestra como uno de los índices espectrales más adecuados para detectar cambios en la cubierta vegetal, mostrando unos resultados más cortos de diferencia entre ambos años del periodo de estudio frente a otros índices.

El Índice de Humedad de Diferencia Normalizada (NDMI) mide el contenido de humedad en la vegetación. Al igual que el índice MSI anteriormente visto, es idóneo para analizar el estrés hídrico en los cultivos. Los valores de este índice se encuentran en el intervalo de -1 a 1, donde los valores altos indican alta cobertura del dosel, con bajos niveles de estrés hídrico. El gráfico obtenido en la **figura 20** muestra resultados interesantes, ya que puede verse como los valores de NDMI se han visto reducidos en mayor o menor medida en las 3 categorías de cubierta vegetal presentes. Esto quiere decir que el contenido de humedad presente en la vegetación es menor en 2018, siendo también mayor su estrés hídrico. Este proceso puede producirse debido a una mayor transpiración de los bosques. Como refleja la **figura 15** anteriormente vista, la superficie ocupada por los bosques ha pasado del 63 al 82%. Los bosques tienden a tener una alta tasa de transpiración, absorbiendo el agua del suelo a través de sus raíces y liberándola a la atmosfera a través de sus hojas. Este proceso podría explicar la reducción de la humedad percibida en 2018 respecto a 1990. Otra hipótesis podría centrarse en un cambio en la evapotranspiración total, debido a que los bosques aumentan la evapotranspiración, pudiendo traducirse en una disminución de la humedad del suelo. También podría ser causa de una alteración del ciclo hidrológico de la zona de estudio, siendo los bosques capaces de interceptar la lluvia en la copa de los árboles, reduciendo la cantidad de agua que llega al suelo. Tampoco hay que olvidar los factores climáticos de 2018 en el municipio de Fiscal, como la precipitación registrada o un aumento de la temperatura. En este sentido, no se cree que pueda ser la causa ya

que 2018 fue un año en el cual las precipitaciones anuales se situaron por encima de la media (1429,6 mm.). Por lo tanto, la causa a la cual se le atribuye finalmente esta reducción en el contenido de humedad de la vegetación es el aumento de la superficie ocupada por bosques que, inicialmente, requieren mayor cantidad de agua, aumentando la transpiración y evapotranspiración total de la vegetación.

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) es comúnmente utilizado para realizar mediciones de la densidad y la salud de la vegetación. Este índice utiliza la diferencia de las bandas del rojo visible y del infrarrojo cercano para mostrar la curva de reflectancia espectral tan característica de la vegetación sana. Esta diferencia muestra valores situados entre -1 y 1, donde los valores más próximos a 1 indican una vegetación densa y saludable. Bien es sabido por todo el mundo la gran utilidad de este índice para mostrar la densidad de la vegetación y su estado. La **figura 20** muestra lo que se esperaba encontrar: los valores han aumentado en cada una de las categorías de vegetación estudiadas. Se puede afirmar que es un índice idóneo que refleja cambios en la cubierta vegetal y por lo tanto es válido para la detección de estos cambios.

El Índice de Vegetación Ajustado por Suelo (SAVI) es muy similar al NDVI, pero posee un factor de corrección para minimizar el efecto del suelo desnudo en las mediciones de la vegetación. El rango de valores generalmente varía entre -1 y 1, donde valores más altos indican mayor presencia de vegetación. A la vista de los resultados que arroja la **figura 20** se puede determinar que el índice SAVI es muy similar al NDVI. En el caso de nuestro área de estudio, el factor de corrección que aplica este índice para minimizar el efecto del suelo es mínima, ya que prácticamente la totalidad del suelo está cubierto por vegetación. Por lo tanto, este índice puede resultar de mayor utilidad para otros escenarios de estudio en las cuales los usos del suelo sean de otra índole.

Finalmente, el análisis de los índices espectrales en cada año de estudio (**figura 20**) y para cada categoría de las coberturas vegetales (**figura 21**) permite valorar cuales son los mejores índices para detectar cambios la cubierta vegetal.

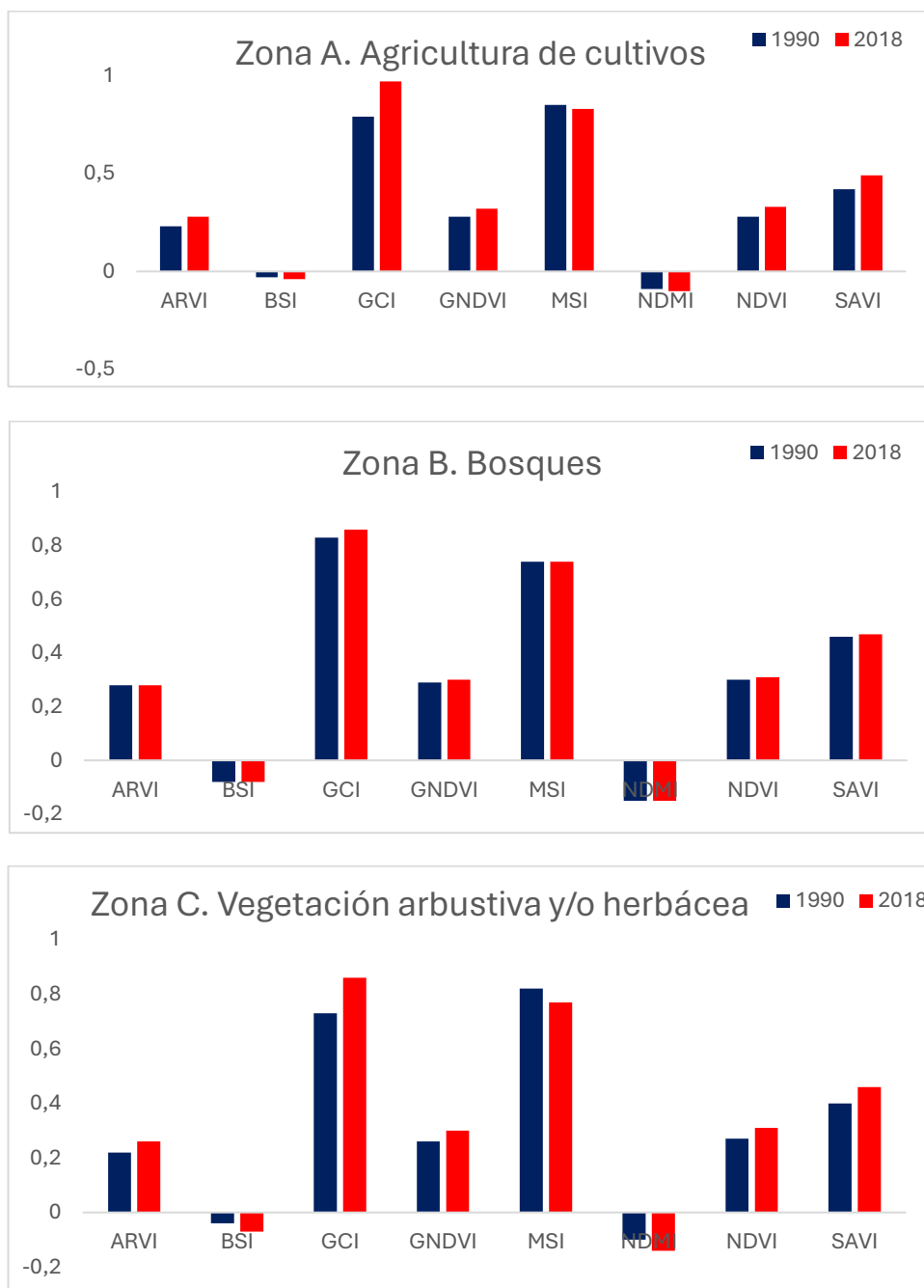


Figura 20: Valores medios de los índices espectrales en cada categoría de la cobertura vegetal (Zona A, Zona B, Zona C) en julio de 1990 y 2018. Fuente: Elaboración propia.

El índice GCI es el que representa un mayor aumento de 1990 a 2018. La **tabla 6** muestra el porcentaje de variación producido en cada una de las categorías de cubierta vegetal. El porcentaje de variación es del 22,78, 3,61 y 17,81%, respectivamente. Cabe recordar que este índice estima la cantidad de clorofila de las plantas, es decir, su productividad fotosintética y salud. Este resultado refleja que la salud de la vegetación ha aumentado, siendo mayor su productividad fotosintética.

Tabla 6: Variación (%) del índice GCI en julio de 1990 y 2018 en cada categoría de cubierta vegetal.

Fuente: Elaboración propia.

GCI	1990	2018	Variación (%)
A	0,79	0,97	22,78
B	0,83	0,86	3,61
C	0,73	0,86	17,81

Otro de los índices que muestran un claro aumento es el GNDVI, NDVI y SAVI. Estos tres índices están muy relacionados entre sí ya que tanto el GNDVI como el SAVI son variantes del NDVI que utilizan otras bandas. Concretamente, el GNDVI utiliza la banda verde en lugar de la roja para detectar el contenido de variabilidad de clorofila y el SAVI, que incorpora un factor de corrección “L” para zonas de baja cobertura vegetal o alto contenido de suelo visible. Este factor de corrección tiene un valor de 0,5. Estos índices son utilizados para medir la densidad de la vegetación. La **figura 20** muestra el aumento de los valores de estos índices, por lo que podemos confirmar que se ha producido un aumento de la densidad de la vegetación en las tres categorías de vegetación.

6. Conclusiones

En el presente trabajo, se ha realizado un estudio de los principales índices espectrales que pueden utilizarse para monitorear los cambios producidos en la cubierta vegetal. El estudio se ha realizado en el municipio de Fiscal, un área montañosa, con abundantes precipitaciones, y actividad hídrica. El análisis de la evolución temporal de las cubiertas vegetales se realiza a partir de la comparación de dos años 1990 y 2018, para dos momentos del año, invierno (enero) y verano (julio).

Uno de los primeros resultados obtenidos a través de la datos proporcionados por el proyecto CLC indica de una manera muy visual y clara que se ha producido importantes cambios en la cobertura vegetal en el área de estudio desde 1990 a 2018, concretamente ha aumentado la superficie de bosques en a expensas de la superficie de cultivos y vegetación herbácea. Estos resultados corroboran la actual tendencia que están atravesando los usos del suelo en zonas españolas de montaña, provocándose un periodo de transición de zonas de matorral y vegetación herbácea, anteriormente campos de cultivos abandonados, hacia una cubierta vegetal conformada por bosques y en general, más homogénea. Hay que tener en cuenta las ventajas y desventajas que

tiene el aumento de la densidad de los bosques y lograr una gestión forestal lo más sostenible posible.

Como era de esperar, también se han obtenido unos resultados que muestran diferencias notables en la actividad vegetal en función del periodo estacional (enero para invierno y julio para verano). Los índices espectrales muestran valores más elevados en verano respecto al invierno debido a una mayor actividad fotosintética por la disponibilidad de unas mejores condiciones de luz solar, temperatura y disponibilidad de agua.

Los últimos resultados obtenidos abordan el uso de índices espectrales para determinar cambios en la vegetación en el periodo de tiempo del estudio. Se han apreciado diferencias en los valores medios de los índices espectrales analizados, incrementando la mayoría de ellos sus valores de un año a otro, confirmando la hipótesis planteada al comienzo del trabajo sobre la capacidad de detección de cambios de los índices espectrales. La mayoría de los índices espectrales ofrecen buenos resultados, siendo el índice GCI y el NDVI y sus variantes los que mejor reflejan un cambio en sus valores medios, que se traducen con un cambio en las características de la cubierta vegetal.

Estos resultados son una gran fuente de información en el contexto de la investigación ya que ratifican los estudios ya realizados en otras zonas similares sobre el proceso por el cual la cubierta vegetal está modificando en las últimas décadas. De esta manera, queda claro que es fundamental apoyarse en las herramientas de teledetección para realizar estudios de esta índole.

Este trabajo presenta ciertas limitaciones de estudio que han de mencionarse. La metodología aplicada podría ampliarse analizando más índices espectrales, así como aumentar el periodo temporal de estudio investigando otros años e incluso un mes para cada estación del año o ampliar la zona de estudio. Finalmente se ha optado por el estudio de 1990 y 2018 y las estaciones de invierno y verano en Fiscal, ya que el objetivo es realizar un estudio multitemporal que arroje las mayores diferencias posibles en relación a la cubierta vegetal. Los resultados podrían haber sufrido algún cambio puntual en el estudio de algún año específico por diversas causas, pero la tendencia habría sido la misma ya que se han estudiado el primer y último año disponibles.

Para futuras líneas de investigación, queda claro que el uso de teledetección resulta de gran utilidad para avanzar en esta línea de trabajos. Además, la tecnología

para la obtención de información y los sistemas de información geográfica para su tratamiento se encuentran en constante avance tecnológico.

A modo de conclusión, este estudio demuestra claramente cómo la teledetección es una herramienta fundamental y muy versátil para realizar estudios relacionados con las Ciencias Ambientales. En el caso de nuestro estudio, se ha comprobado cómo con el uso de índices espectrales y datos obtenidos del proyecto CLC, con su respectivo tratamiento digital de los datos a través de un sistema de información geográfico, es posible detectar cambios en la cubierta vegetal en el municipio de Fiscal.

7. Bibliografía

- CARVACHO, L., & SÁNCHEZ MARTÍNEZ, M. (2010). Comparación de índices de vegetación a partir de imágenes MODIS en la región del Libertador Bernardo O'Higgins, Chile. En J. Ojeda, M. F. Pita, & I. Vallejo (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos* (pp. 728-737). *Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla*.
- CASTAÑO FERNÁNDEZ, S., REYES RUIZ GALLARDO, J., & VELA MAYORGA, A. La Teledetección: Sus bases.
- Centro Nacional de Información Geográfica. Centro de descargas del CNIG. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. Obtenida de: <https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/>
- CHUVIECO SALINERO, E. (2010). Teledetección ambiental. Madrid: Ariel.
- Componentes y proceso de un sistema de Teledetección. Recuperado de <https://revolucioncomunicacion.weebly.com/teledeteccionacuten.html>
- DI LEO, N. (2023). Sensoramiento remoto para aplicaciones agropecuarias: A más de medio siglo del segundo comienzo. *Agromensajes de la Facultad*, (67), 25-28.
- EarthExplorer. (n.d.). *USGS EarthExplorer*. U.S. Geological Survey. Recuperado de <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Gobierno de Aragón, Instituto Geográfico de Aragón. (n.d.). *Atlas climático de Aragón*. Recuperado de <https://idearagon.aragon.es/atlas/Clima/info/atlas-climatico-aragon-2007>
- Gobierno de Aragón. (s.f.). Infraestructura de Conocimiento Espacial de Aragón. ICEARAGON. <https://idearagon.aragon.es/portal/>

- KAWABATA, A., ICHII, K., & YAMAGUCHI, Y. (2001). Global monitoring of interannual changes in vegetation activities using NDVI and its relationships to temperature and precipitation. *International Journal of Remote Sensing* 22: 1377-1382.
- Landsat Science. (s.f.). United States Geological Survey (USGS). Recuperado de <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>
- LASANTA, T., & VICENTE-SERRANO, S. M. (2007). Cambios en la cubierta vegetal en el Pirineo aragonés en los últimos 50 años. *Instituto Pirenaico de Ecología CSIC. Pirineos*, 162, pp. 125 – 154.
- LASANTA, T., VICENTE-SERRANO, S., & CUADRAT, J. M. (2000). Marginación productiva y recuperación de la cubierta vegetal en el Pirineo: un caso de estudio en el Valle de Borau. *Boletín de la A. G. E.*, 29, 5-28.
- LÓPEZ M. J.; CASELLES, V. (1991): introducción a la Teledetección, en La Teledeteccion en el Seguimiento de los fenómenos naturales. Recursos renovables: Agricultura. Universitat de Valencia. Valencia.
- MARTÍN ORTIZ, P. (2023). Estado actual de la cubierta forestal afectada por el incendio de Villarlengo (1994), utilizando teledetección óptica y LiDAR. Trabajo Fin de Grado, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Informáticos.
- OLIVÁN BESCÓS, J. (2018). Caracterización de la dinámica de las dobles cosechas en el Canal de Aragón y Cataluña mediante series temporales de NDVI.
- RODRÍGUEZ ROMERO, C. (2021). Evaluación anual de la evolución de coberturas del suelo y vegetación en una zona de olivar en Estepa, Sevilla. *Trabajo Fin de Grado*, Universidad de Sevilla.
- ROMERO CABEZUDO, S. (2019). Análisis multitemporal del recubrimiento vegetal en la Comarca del Matarraña usando teledetección y SIG. *Trabajo Fin de Grado*, Universidad de Zaragoza.
- VALDEZ ALVARADO, A. R. (2011). Nanosatélites. Universidad Mayor de San Andrés, Taller de Sistemas de Información.
- VICENTE-SERRANO, S. M., BEGUERÍA, S., & LASANTA, T. (2006). Diversidad espacial de la actividad vegetal en campos abandonados del Pirineo Central español: análisis de los procesos de sucesión mediante imágenes Landsat (1984-2001). *Pirineos*, 161.

VICENTE-SERRANO, S. M., LASANTA, T., & ROMO, A. (2003). Diferencias espaciales en la evolución del NDVI en la cuenca alta del Aragón: efectos de los caminos en el uso del suelo. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 29.

VICENTE-SERRANO, S. M., LASANTA, T., & ROMO, A. (2005). Analysis of Spatial and Temporal Evolution of Vegetation Cover in the Spanish Central Pyrenees: Role of Human Management. *Environmental Management* Vol. 34, No. 6, pp. 802–818.

8. Anexos

Las siguientes figuras se han obtenido durante la realización del trabajo y han servido de apoyo complementario para la elaboración de este estudio.

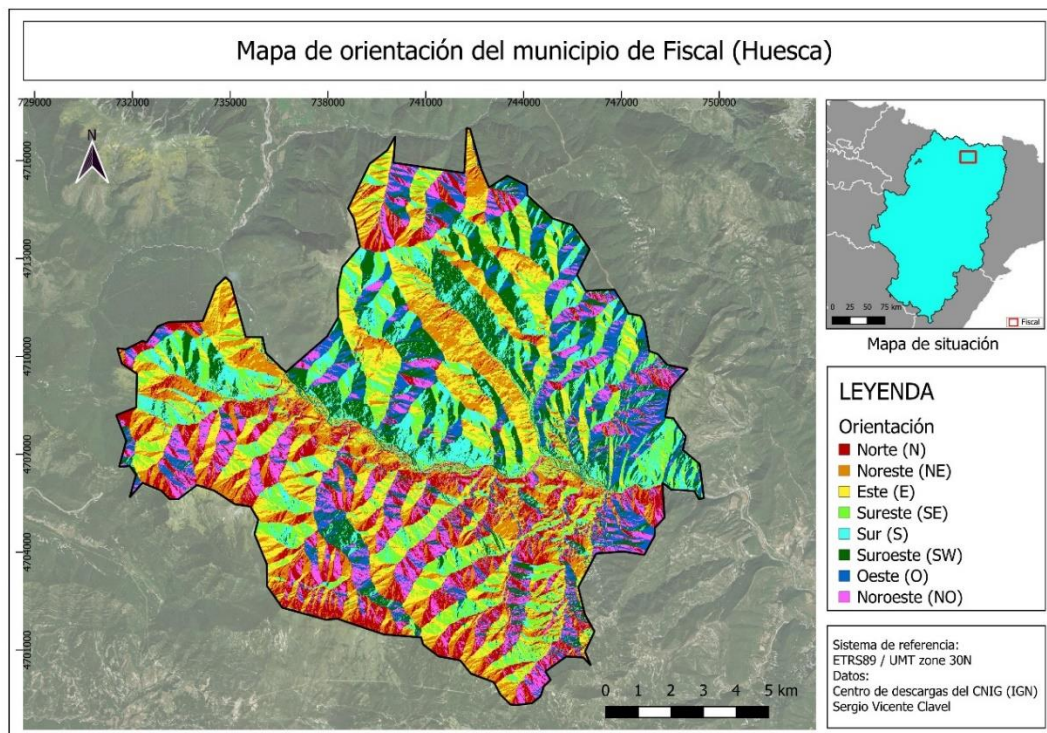


Figura 21: Mapa de orientación del municipio de Fiscal. Fuente: Elaboración propia.

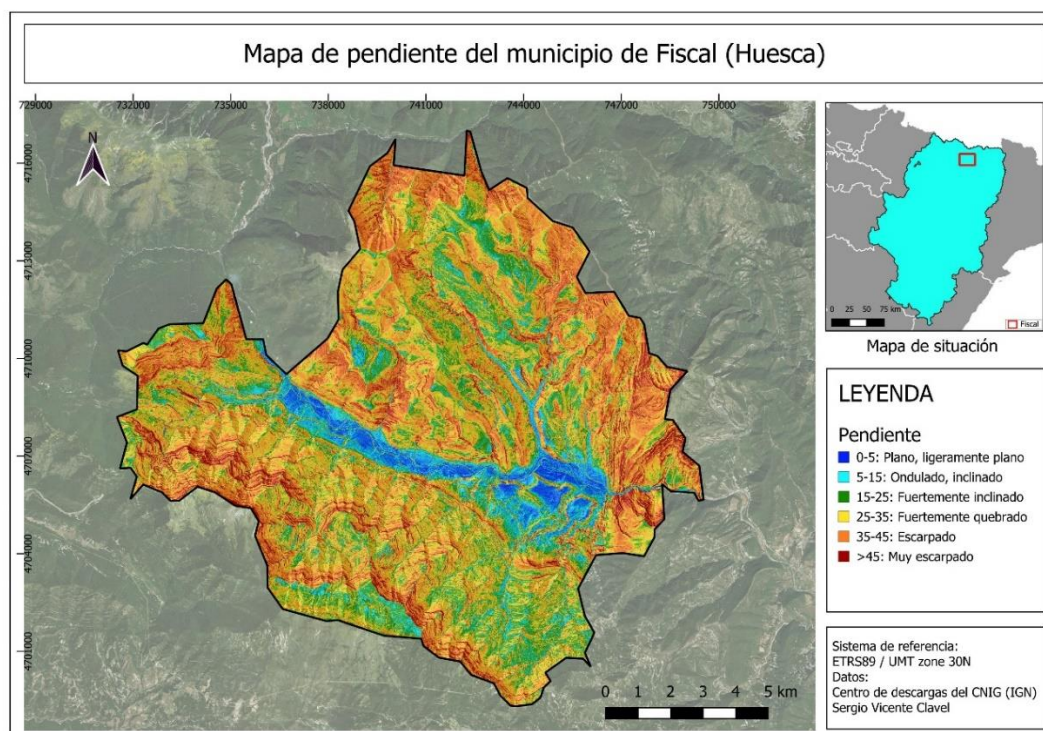


Figura 22: Mapa de pendiente del municipio de Fiscal. Fuente: Elaboración propia.

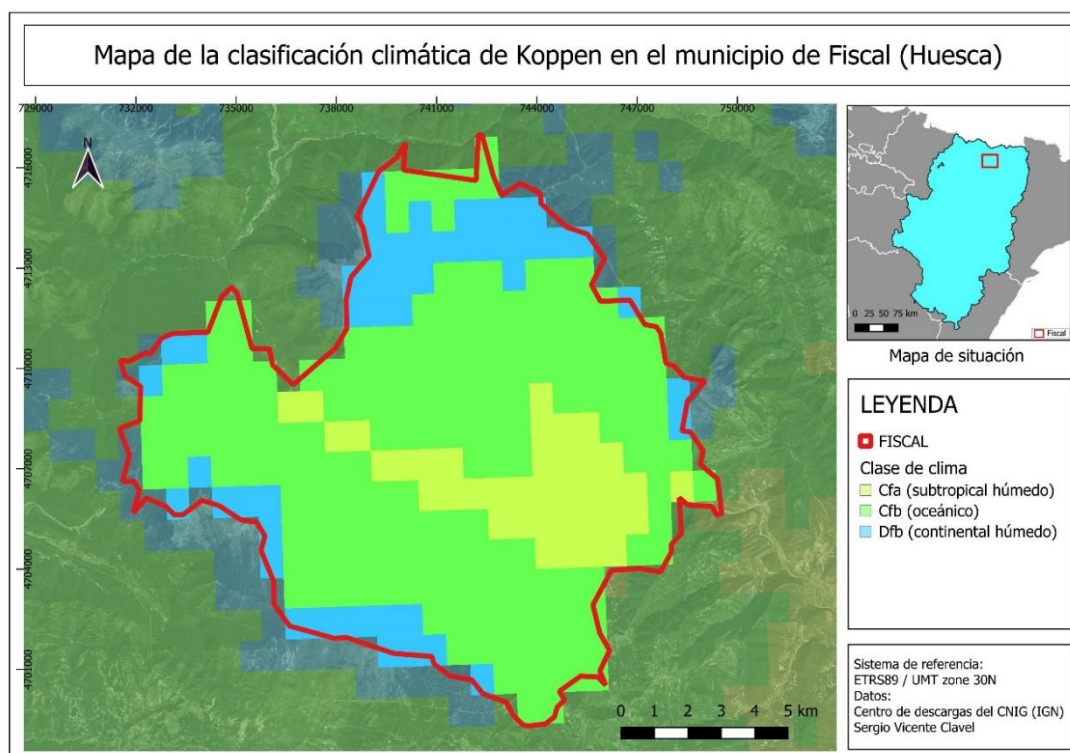


Figura 23: Mapa de la clasificación climática de Köppen en el municipio de Fiscal. Fuente: Elaboración propia.

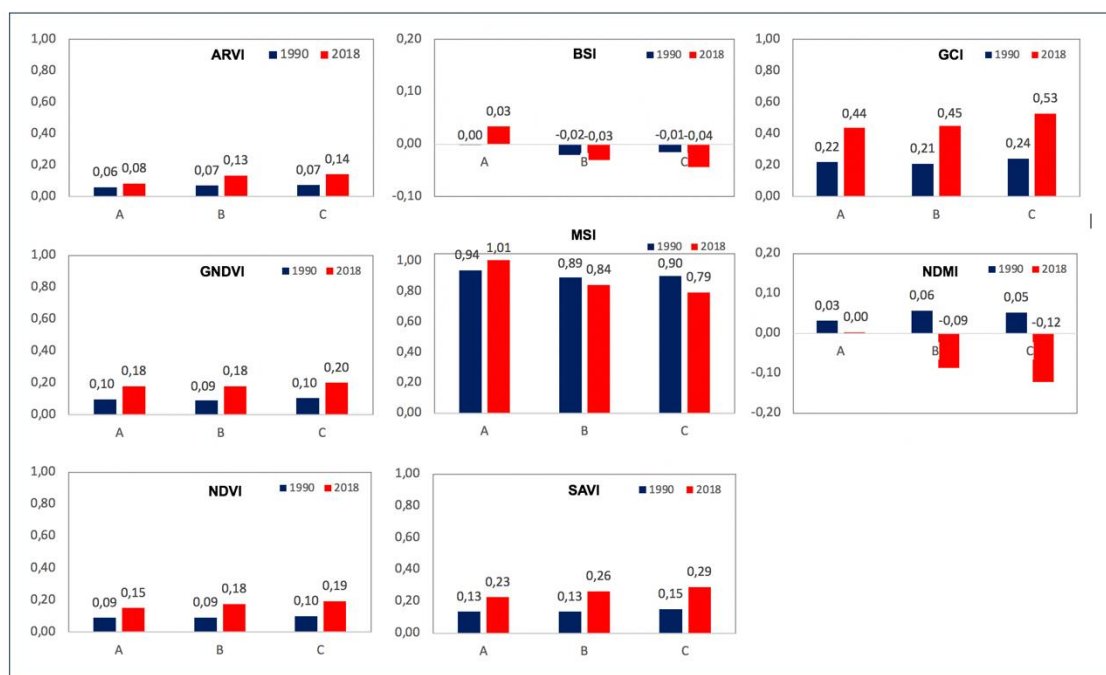


Figura 24: Valores medios de índices espectrales por categoría en enero de 1990 y 2018. Fuente: Elaboración propia.