

ESCUELA DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN Y ELECTRÓNICA



TRABAJO FIN DE GRADO

**ANÁLISIS FENOLOGICO DE LA VEGETACIÓN DEL PARQUE NACIONAL
DE LA CALDERA DE TABURIENTE MEDIANTE EL PROCESADO
MULTITEMPORAL DE DATOS MULTIESPECTRALES DE
TELEDETECCIÓN.**

Titulación: Grado en Ingeniería en Tecnologías de la Telecomunicación

Mención: Sistemas de Telecomunicación

Autor/a: Estefanía Abigail Morales de la Hoz

Tutores: Dionisio Rodríguez Esparragón y Francisco Javier Marcello Ruiz

Fecha: enero de 2026

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis tutores de TFG, quienes han demostrado una paciencia infinita y una disposición admirable para adaptarse a mis circunstancias. Gracias a su apoyo y sus consejos, he podido avanzar en este trabajo con la seguridad de que contaba con su ayuda en cada paso del camino, procurando siempre que la entrega final alcanzara la mejor calidad posible.

A mi madre. Su presencia incondicional, su ánimo constante y su confianza en mí han sido pilares fundamentales a lo largo de toda mi vida. Su apoyo en cada logro y en cada dificultad ha hecho que nunca me sintiera sola frente a los desafíos.

A mi pareja, le debo un reconocimiento especial. En esta última etapa, cuando el cansancio y el desánimo parecían superar mis fuerzas, su apoyo incondicional, sus palabras de ánimo y su compañía constante me han permitido seguir adelante. Ha sido un pilar constante, motivándome en los momentos difíciles y estando presente en cada avance hasta que este proyecto se ha hecho realidad.

A mis amigos, gracias por su comprensión y por estar siempre cerca. Sus mensajes, su compañía y su humor me han permitido despejarme, recargar energías y seguir con ánimo.

A todos ellos, gracias por ser parte de este camino y por ayudarme a convertir este trabajo en una experiencia de aprendizaje y crecimiento personal.

Contenido

Parte I. Memoria	
Capítulo 1: Introducción	1
1.1 Antecedentes	2
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Estructura de la memoria	4
Capítulo 2: Sistemas de Teledetección	6
2.1 Introducción a los Sistemas de Teledetección	7
2.2 Firmas Espectrales	10
2.3 Bandas Espectrales	12
2.4 Satélites de Teledetección: Planet.....	14
2.4.1 Constelación PlanetScope.....	15
2.4.2 Sensores SuperDove	15
2.5 Preprocesado de Imágenes Multiespectrales	17
2.5.1 Correcciones Radiométricas	19
2.5.2 Correcciones Geométricas	21
Capítulo 3: La vegetación de La Palma e introducción a los índices de vegetación.	24
3.1 Vegetación de la isla de La Palma	25
3.2 Índices de Vegetación	33
3.2.1 Índices de Banda Ancha	34
3.2.2 Banda Estrecha	41
Capítulo 4: Sistemas y Entornos de Procesamiento de Datos para Teledetección.	44
4.1 Uso del lenguaje de programación Python en teledetección.	45
4.2 Aplicaciones de Python en el análisis fenológico del Parque Nacional de La Caldera de Taburiente.....	45
4.3 Integración de Python con QGIS para la visualización y el análisis.	46
4.4 Entorno: Google Colab y Google Drive.	46
4.5 Metodología general del flujo de trabajo.....	49

Capítulo 5: Preprocesamiento y Preparación de Imágenes Satelitales para Análisis Fenológico.	51
5.1 Evaluación inicial de imágenes y criterios de selección.....	52
5.1.1 Revisión visual de imágenes en QGIS	52
5.1.2 Clasificación cualitativa y elaboración de tabla de imágenes	53
5.1.3. Selección final de imágenes por estación y año	54
5.2 Generación de mosaicos satelitales	57
5.2.1 Composición de imágenes	57
5.2.2 Automatización del proceso mediante Python y GDAL	58
5.3 Recorte espacial al área de estudio	59
5.3.1 Delimitación espacial: Parque Nacional, parcelas de vegetación y zona del incendio	59
5.4 Correcciones geométricas y radiométricas	61
5.5 Conclusión.....	66
Capítulo 6. Procesamiento de los Índices de Vegetación y Extracción de Resultados por Parcelas.	67
6.1. Introducción al procesamiento.....	68
6.1.1. Herramientas empleadas y entorno de desarrollo.....	68
6.2. Preparación de bandas espectrales para análisis multitemporal	69
6.2.1. Lectura y normalización de datos multibanda	69
6.3 Cálculo y visualización de índices de vegetación	71
6.3.1 Cálculo automatizado de índices	71
6.4 Evaluación de los índices generados	77
6.4.1 Criterios de selección.....	77
6.4.2 Resultados del análisis.....	77
6.4.3 Selección final de índices	79
6.5 Estadísticas zonales por parcela y fecha.....	79
6.5.1 Objetivos del análisis estadístico zonal	80

6.5.2 Delimitación de zonas de análisis.....	81
6.5.3 Representación espacial de los índices de vegetación.....	83
6.5.4 Organización de resultados para el análisis gráfico.....	86
6.5.5 Visualización temporal de los índices por parcela.....	87
6.5.6 Comparativa entre formaciones vegetales mediante boxplots	96
6.5.7 Enfoque específico: zona del incendio	101
6.5.8 Interpretación final de resultados	107
Capítulo 7. Conclusiones.....	109
7.1 Revisión de los objetivos planteados.....	110
7.1.1 Objetivo 1: Preprocesado de imágenes PlanetScope.....	110
7.1.2 Objetivo 2: Cálculo de índices de vegetación	111
7.1.3 Objetivo 3: Análisis fenológico por parcelas.....	112
7.2 Conclusiones del análisis de resultados.....	113
7.2.1 Comportamiento por índice de vegetación.....	113
7.2.2 Comparación entre formaciones vegetales	113
7.2.3 Estudio del impacto del incendio	114
7.3 Líneas futuras de trabajo.....	115
7.3.1 Ampliación del análisis temporal	115
7.3.2 Mejora en la calidad y diversidad de datos.....	115
7.3.3 Automatización y análisis avanzado.....	115
Bibliografía.....	117
B1. Referencias bibliográficas.....	118
Parte II. Pliego de Condiciones	125
Parte III: Presupuesto	129
P1. Presupuesto completo.....	130
P1.1 Recursos materiales.....	130
P1.2 Recursos hardware	130

P1.3 Recursos software	131
P1.4 Imágenes satelitales y cartografía.....	131
P1.5 Recursos humanos.....	132
P1.7 Redacción del documento	132
P1.8 Material fungible	132
P1.9 Impuestos	133
Parte IV: ANEXOS	134
ANEXO I. Tabla de evaluación de imágenes.	135
ANEXO II. Correcciones radiométricas de las 16 imágenes.	141
ANEXO III. Estadísticas extraídas	142
ANEXO IV. Mapas generados con Python	143
ANEXO V. Mapas elaborados con QGIS.....	161
ANEXO VI. Gráficas de evolución temporal.....	178
ANEXO VII. Código utilizado para el cálculo de índices de vegetación	201
AVII.1 Montar google drive	202
AVII.2 Extracción de bandas	202
AVII.3 Máscara para corregir nubes y sombras	203
AVII.4 Cálculo de índices de vegetación BBG	205
AVII.5 Cálculo de índices de vegetación NBG	207
AVII.6 Se guardan los resultados en mi DRIVE	208

Parte I. Memoria

Capítulo 1: Introducción

En este capítulo se incluyen los fundamentos generales del trabajo, los objetivos que se persiguen con su realización y la estructura que sigue la memoria. Se da a conocer la importancia del análisis fenológico mediante teledetección en el Parque Nacional de la Caldera de Taburiente, así como la utilidad del procesamiento automático de imágenes satelitales para el estudio multitemporal de la vegetación.

El comportamiento temporal de la vegetación constituye un elemento clave para la conservación de los ecosistemas, especialmente en áreas de alto valor ecológico como los parques nacionales. En este contexto, la teledetección ha adquirido un papel fundamental como herramienta para analizar y monitorizar el estado de la vegetación en diferentes escalas espaciales y temporales. El acceso a series temporales multiespectrales con alta resolución espacial permite abordar estudios fenológicos de forma precisa, detectando patrones estacionales y posibles respuestas a factores ambientales.

El presente Trabajo Fin de Grado se centra en el análisis fenológico de la vegetación del Parque Nacional de la Caldera de Taburiente, ubicado en la isla de La Palma (Islas Canarias). Este espacio natural destaca por su complejidad topográfica, su heterogeneidad ambiental y su elevado número de especies endémicas, lo que lo convierte en un espacio natural idóneo para estudios sobre la evolución de la vegetación.

Para ello, se empleará el procesado multitemporal de imágenes multiespectrales procedentes de la constelación Planet, concretamente del sensor SuperDove, que proporciona datos con resolución espacial de 3 metros y 8 bandas espectrales. La disponibilidad constante de imágenes de alta resolución permite realizar un seguimiento detallado del comportamiento fenológico de la vegetación en diferentes zonas del parque y a lo largo de diversas fechas.

Este trabajo propone, por tanto, un análisis basado en índices de vegetación y en la evolución temporal de su comportamiento, con el fin de caracterizar la dinámica fenológica y aportar información útil para la gestión y conservación del Parque Nacional.

1.1 Antecedentes

La teledetección es una disciplina basada en la adquisición de información de la superficie terrestre mediante sensores instalados en plataformas aéreas o satelitales. A través del análisis de la radiación electromagnética reflejada o emitida por los objetos terrestres, es posible obtener información sobre las características físicas, químicas y la estructura del terreno o de la vegetación. Esta radiación, registrada en diferentes longitudes de onda, conforma la denominada firma espectral, que permite diferenciar

materiales y estados fisiológicos, y constituye la base del análisis de la vegetación mediante índices espectrales.

En el campo del estudio de la vegetación, la teledetección multispectral resulta especialmente útil para monitorizar la evolución de la cubierta vegetal, evaluar su vigor, identificar patrones estacionales y detectar procesos de estrés o degradación. El crecimiento de empresas privadas con sus propias constelaciones de satélites, como Planet, ha permitido disponer de imágenes con mucha mejor resolución y con una frecuencia de actualización muy alta. Gracias a ello, ahora es posible realizar estudios muy detallados incluso en zonas pequeñas, como los parques nacionales.

El Parque Nacional de la Caldera de Taburiente presenta una notable diversidad ecológica, con un marcado gradiente altitudinal y una fuerte influencia de factores climáticos y geográficos. Sus ecosistemas, dominados por el pino canario y especies endémicas, requieren una monitorización constante para detectar cambios asociados a perturbaciones, variabilidad climática o impacto humano.

El uso de imágenes de Planet, y concretamente del sensor SuperDove, permite captar variaciones de la vegetación con detalle gracias a su resolución espacial de 3 por 3 metros, y la disponibilidad de 8 bandas espectrales adecuadas para el cálculo de índices de vegetación.

1.2 Objetivos

El objetivo general del presente Trabajo Fin de Grado es analizar la dinámica fenológica de la vegetación del Parque Nacional de la Caldera de Taburiente mediante el procesado multitemporal de imágenes multispectrales procedentes del sensor SuperDove (Planet).

Para alcanzar esto, se plantean los siguientes objetivos específicos:

O1. Preprocesado de las imágenes Planet

Realizar las correcciones radiométricas, geométricas y atmosféricas necesarias para obtener una base de datos homogénea y coherente a lo largo del tiempo. Generar mosaicos multitemporales que cubran la totalidad del Parque Nacional y permitan el análisis fenológico.

O2. Cálculo de índices de vegetación

Aplicar técnicas de procesamiento de imágenes para obtener los índices de vegetación más relevantes (como NDVI, EVI, GNDVI, entre otros), generando mapas temáticos y series temporales que describan el comportamiento de la vegetación a lo largo del periodo de estudio.

O3. Análisis fenológico por parcelas

Seleccionar parcelas representativas dentro del parque y analizar su evolución temporal mediante los índices de vegetación calculados. Identificar patrones fenológicos característicos, variaciones estacionales, anomalías y posibles procesos de estrés o regeneración.

1.3 Estructura de la memoria

La memoria se organiza en siete capítulos principales, seguidos de dos partes adicionales correspondientes al Pliego de Condiciones y al Presupuesto. La estructura completa es la siguiente:

- Capítulo 2: Presenta los fundamentos de la teledetección, las firmas espectrales, las bandas multispectrales, las características de PlanetScope y los procesos de preprocesado de imágenes.
- Capítulo 3: Describe la vegetación de la isla de La Palma e introduce los principales índices de vegetación utilizados en el análisis.
- Capítulo 4: Expone el sistema de procesamiento de datos utilizado, incluyendo Python, QGIS, Google Colab y la metodología general del flujo de trabajo.
- Capítulo 5: Detalla el preprocesado de las imágenes PlanetScope, desde la evaluación inicial hasta la generación de mosaicos y correcciones necesarias.
- Capítulo 6: Desarrolla el núcleo del análisis, incluyendo el cálculo de índices, su evaluación, la extracción de estadísticas zonales, las comparativas entre parcelas y el estudio de la zona quemada.
- Capítulo 7: Presenta las conclusiones, evaluando el grado de cumplimiento de los objetivos y proponiendo futuras líneas de investigación.

Trabajo Fin de Grado

- Parte II: Pliego de Condiciones: Incluye las especificaciones técnicas, legales y metodológicas del proyecto.
- Parte III: Presupuesto: Desglosa los recursos materiales, hardware, software, coste de imágenes, recursos humanos y otros gastos asociados.
- Parte IV: Anexos: Incluyen las tablas completas, estadísticas originales, datos derivados del Excel, mapas y cualquier información complementaria.

Capítulo 2: Sistemas de Teledetección

El Capítulo 2 introduce los fundamentos de los sistemas de teledetección, explicando cómo los sensores remotos captan información de la superficie terrestre sin contacto directo. Se describen los tipos de sensores, las plataformas satelitales y los principios físicos implicados en la captura de datos multiespectrales. También se aborda la importancia de la resolución espacial, espectral y temporal. Con este marco teórico se puede entender el uso de imágenes satelitales en el análisis de vegetación desarrollado en el trabajo.

2.1 Introducción a los Sistemas de Teledetección

La teledetección es la técnica empleada para recopilar información de la superficie terrestre mediante sensores ubicados en plataformas espaciales. La interacción electromagnética entre el terreno y el sensor dará lugar a una serie de datos, los cuales se procesarán posteriormente con el fin de extraer información interpretable de la Tierra. Esta técnica se basa en estudiar variaciones temporales, espaciales y espectrales de las ondas electromagnéticas.

La observación remota de la superficie terrestre constituye el marco de estudio de la teledetección. Como hemos indicado anteriormente, esto no engloba solo los procesos que permiten obtener una imagen desde el aire o espacio, sino también su posterior tratamiento, para una determinada aplicación. Un sistema de teledetección espacial incluye habitualmente los siguientes elementos:

1. **Fuente de energía:** Es el origen del flujo energético detectado por el sensor.
2. **Cubierta terrestre:** Recibe la señal procedente de la fuente de energía y la refleja de acuerdo con sus características.
3. **Sistema sensor:** Encargado de captar la energía procedente de la cubierta terrestre, codificarla y enviarla directamente al sistema de recepción.
4. **Sistema de recepción:** Recibe la información transmitida por la plataforma y se distribuye a los intérpretes.
5. **Intérprete:** Analiza e interpreta la información recibida.
6. **Usuario final:** Evalúa el documento resultante de la interpretación y toma decisiones basadas en sus conclusiones.

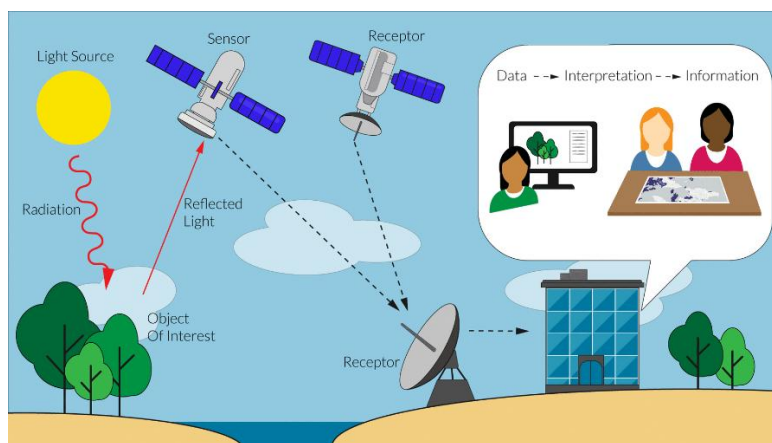


Figura 2.1. Componentes de un sistema de teledetección [1].

Los inicios de la teledetección datan de 1859, cuando se lograron las primeras imágenes aéreas desde un globo. En el año siguiente, se repitió la prueba sobre la ciudad de Boston, destacando el interés de esta novedosa perspectiva aérea para obtener un conocimiento más preciso de la estructura urbana.

Sin embargo, fue durante la Segunda Guerra Mundial, cuando se experimentó un significativo avance en las técnicas de teledetección aérea. Este progreso se centró en la mejora de la óptica de las cámaras de reconocimiento y las emulsiones utilizadas. Se incorporaron nuevos sensores como el radar, y se perfeccionaron los sistemas de comunicación. Además, la industria aeronáutica experimentó un notable crecimiento, proporcionando una mayor estabilidad a las plataformas de observación. Estas innovaciones, posteriormente, se aplicaron a usos civiles.

Dentro de las aplicaciones que ofrece la teledetección, en este TFG nos vamos a centrar en la evaluación de las condiciones de la vegetación. Encontraremos en esta técnica numerosas ventajas como: la cobertura global y periódica de la superficie terrestre, la visión panorámica, la información sobre regiones no visibles del espectro y el formato digital de las imágenes que agilizará su tratamiento.

Existen dos formas principales de teledetección: activa y pasiva. Estas se diferencian en el mecanismo de generación y recopilación de la información desde la fuente hasta el sensor remoto:

- **Teledetección activa:** El sensor emite su propia energía hacia el objetivo y luego registra la energía reflejada por los objetos que retorna al sensor.

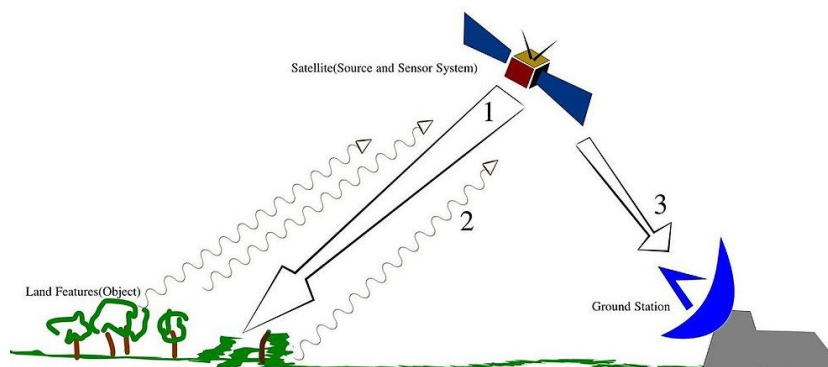


Figura 2.2. Teledetección activa [3].

- **Teledetección pasiva:** En este caso, el sensor simplemente registra la energía electromagnética (generalmente procedente de la región del espectro de la luz visible e infrarroja) que es reflejada o emitida naturalmente por el objeto o la superficie sin que el sensor emita su propia energía [2].

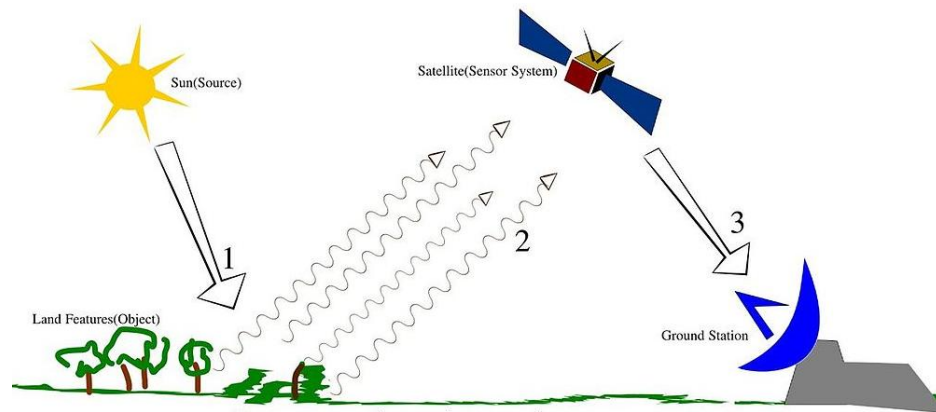


Figura 2.3: Teledetección pasiva [3].

El análisis espectral de la vegetación representa indudablemente una de las tareas más fascinantes dentro del ámbito de la teledetección. A pesar de su gran relevancia, sigue presentando considerables desafíos debido a los diversos factores que afectan la radiancia final detectada por el sensor. En un primer plano, es necesario tener en cuenta la reflectividad inherente de la hoja, la cual varía según su estado fenológico, forma y contenido de humedad. Además, se debe considerar las características morfológicas de la planta, como su altura, perfil, grado de cobertura del suelo, entre otros, los cuales generan una alteración significativa en su comportamiento reflectante. Un tercer conjunto de factores incluye aquellos derivados de la ubicación geográfica de la planta, como la pendiente, orientación, asociación con otras especies, geometría de plantación, y otros elementos similares.

En los siguientes apartados, veremos como el sensor no está diseñado para medir hojas de manera aislada, sino más bien agrupaciones de hojas que conforman masas de vegetación. Esto implica la intervención de otros elementos adicionales que complican el esquema previamente mencionado. Entre estos elementos se encuentran el ángulo de elevación solar (directamente vinculado con la proporción de sombras detectadas por el sensor), las características del suelo que sostiene la vegetación, la geometría de la cubierta vegetal y su estado fenológico, entre otros.

2.2 Firmas Espectrales

La radiación reflejada en función de la longitud de onda se llama firma espectral de la superficie. Todos los objetos emiten radiación electromagnética al interactuar con las fuentes de energía propias o externas. Podremos distinguir diferentes materiales porque cada uno de ellos tiene su propia respuesta espectral, a lo que denominamos “firma espectral” [4].

A continuación, se muestra una figura en la que es posible apreciar como diferentes materiales reflejan distintas cantidades de energía, en diferentes zonas del espectro electromagnético, o lo que es lo mismo, se presentan sus las firmas espectrales. Para cada longitud de onda, la medida de la reflectividad (expresada en porcentaje) se conoce como firma espectral, la cual actúa como una característica distintiva de los objetos. Esta firma proporciona una identificación única y facilita, por ejemplo, la diferenciación entre suelo y vegetación, e incluso entre distintos tipos de suelo o variedades de vegetación.

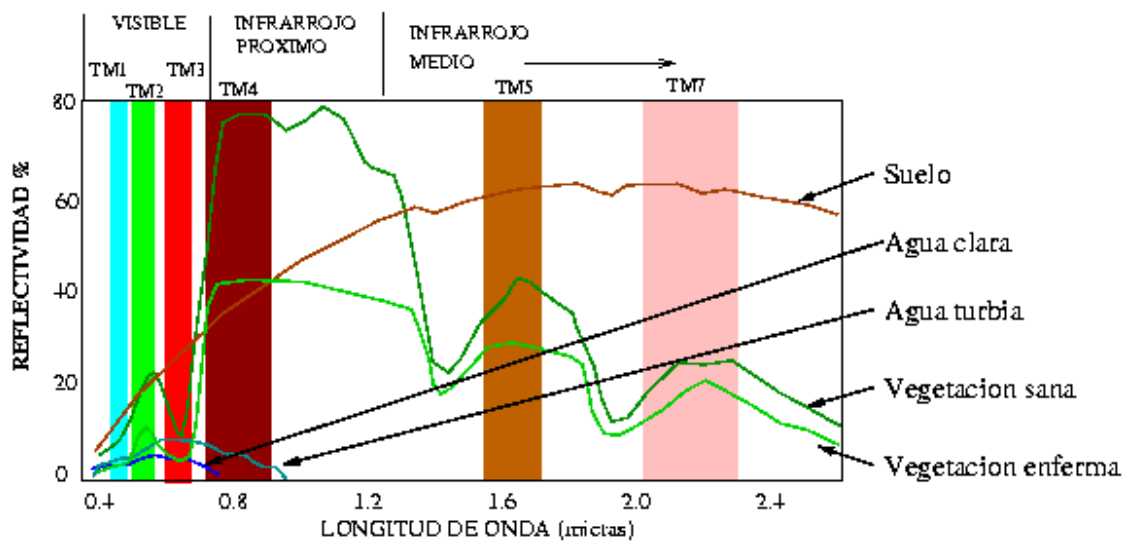


Figura 2.4. Firmas espectrales de distintos materiales [5].

En este análisis de firmas espectrales de diversos materiales, se observan patrones distintivos de reflectancia o emisión de luz en diferentes longitudes de onda. A continuación, se presenta una descripción de las firmas espectrales para cada uno de los materiales, teniendo en cuenta las bandas del espectro visible y NIR:

1. Suelo:

- Visible: En la región visible, el suelo exhibe bajas reflectancias, siendo más oscuro en comparación con otros elementos. Esta puede variar según la composición y color del suelo.

- Infrarrojo Cercano (NIR): La reflectancia en el NIR puede variar, siendo menor en suelos más oscuros y mayor en suelos más claros.

2. Agua Clara:

- Visible: El agua clara absorbe significativamente la luz en la región visible, mostrando bajas reflectancias en estas bandas.

- Infrarrojo Cercano: El agua clara absorbe considerablemente la radiación en el NIR.

3. Agua Turbia:

- Visible: La presencia de partículas suspendidas en el agua turbia aumenta la reflectancia en la región visible, evidenciando una mayor dispersión de la luz.

- Infrarrojo Cercano: Puede observarse un aumento en la reflectancia en el NIR debido a la dispersión de la luz por las partículas suspendidas.

4. Vegetación Sana:

- Visible: La clorofila en las hojas absorbe luz en las bandas azul y roja, resultando en bajas reflectancias en estas regiones.

- Infrarrojo Cercano: La vegetación sana presenta una alta reflectancia en el NIR debido a la reflectancia causada por la estructura de las hojas.

5. Vegetación Enferma:

- Las firmas espectrales de la vegetación enferma pueden mostrar alteraciones en las bandas de absorción de clorofila, indicando estrés o enfermedad.

- Se puede observar una disminución en la reflectancia en el NIR, señalando cambios en la salud de la vegetación.

Por otro lado, el infrarrojo medio (SWIR) es una banda espectral clave para analizar la composición y humedad de los materiales, ya que muestra fuertes absorciones en función del contenido de agua, minerales y estructura química. En el caso del suelo, esta banda permite diferenciar entre tipos de minerales y contenido de humedad, siendo útil para estudios de geología y suelos agrícolas. El agua clara muestra una fuerte absorción en SWIR, mientras que el agua turbia refleja más luz dependiendo de la cantidad de sedimentos.

Además, aunque en el SWIR la vegetación sana refleja más luz que la enferma, la diferencia es menos pronunciada que en el NIR porque la absorción de agua juega un papel importante en esta región del espectro. En cambio, en el NIR, la estructura celular de la planta es el factor principal, lo que genera una variación más drástica en la reflectividad entre vegetación sana y enferma.

Sin embargo, en este estudio no nos centraremos en esta región del espectro, ya que los sensores Planet no operan en el infrarrojo medio. En su lugar, enfocaremos nuestro análisis en el espectro visible y el infrarrojo cercano, que son las bandas captadas por estos sensores y que nos proporcionan la información necesaria para este trabajo.

Por último, debemos considerar que las firmas espectrales pueden variar según la especie de vegetación, el tipo de suelo y las condiciones ambientales específicas en el área de estudio [6].

2.3 Bandas Espectrales

La atmósfera provoca el bloqueo de ciertas longitudes de onda, así las bandas donde la transmisividad atmosférica es superior y obtendremos una mayor reflectividad serán las del espectro visible e infrarrojo. Estas producen reflectividades en porcentajes significativos, por lo que nos van a ser muy útiles para el estudio dentro del rango de longitud de onda (λ) de 0,4 a 2,8 μm . Otra ventana atmosférica que permite el paso de la radiación es la región de las microondas.

A continuación, se procede al desglose de cada una de las bandas mencionadas anteriormente [7]:

- **Espectro visible** [0,4 a 0,78 μm]. Es la única radiación electromagnética que puede detectar el ojo humano. En él distinguimos tres bandas elementales,

definidas por los colores asociados a diferentes longitudes de onda, que son: el azul (0,4 a 0,5 μm), el verde (0,5 a 0,6 μm), y el rojo (0,6 a 0,7 μm).

- **Infrarrojo cercano** [0,78 a 1,3 μm]: discrimina distintas masas vegetales y distingue concentraciones de humedad.
- **Infrarrojo medio** [1,3 a 8 μm]: estima la humedad en zonas de vegetación.
- **Infrarrojo lejano** [8 a 14 μm]: es capaz de medir la temperatura de los objetos.
- **Microondas** [a partir de 1 mm]: transparente a los fenómenos atmosféricos.

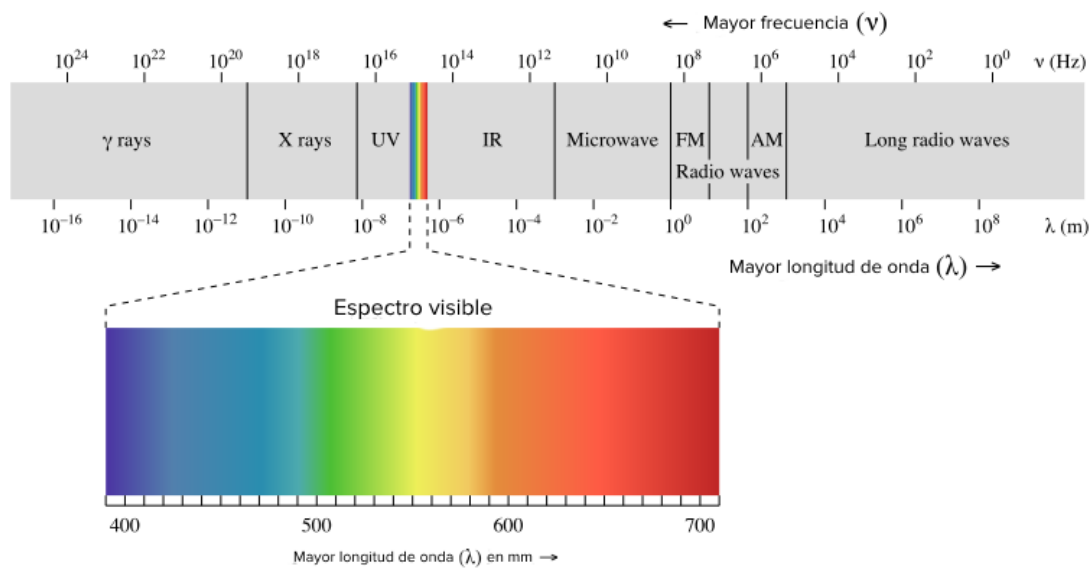


Figura 2.5. Espectro electromagnético [8].

Como se ha mencionado, se trabaja en las anteriores bandas espectrales ya que los gases que componen la atmósfera interactúan con la radiación emitida desde la superficie o la proveniente del exterior del planeta. Para poder visualizar esta interacción entre la atmósfera y la radiación electromagnética, a continuación, se muestra la Figura 2.6.

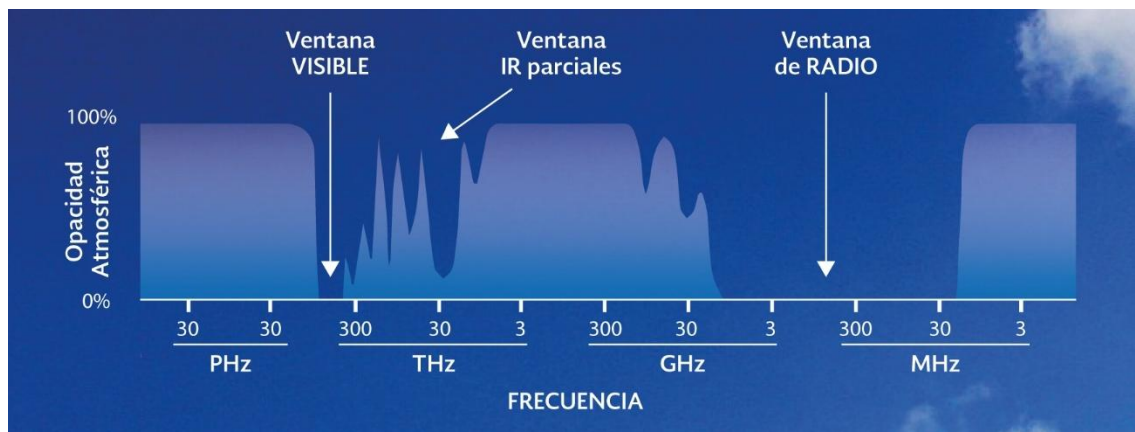


Figura 2.6. Ventanas atmosféricas del espectro electromagnético [9].

La vegetación, al igual que el resto de los objetos, emite una cierta reflectividad, esto es, la cantidad de luz que un objeto refleja en comparación con la cantidad de luz incidente. Esta es captada por un sensor y va a ser distinta dependiendo de las características y situación de la planta. Como hemos visto anteriormente, las bandas del espectro electromagnético visible e infrarrojo, serán en las que se producen mayores reflectividades.

En el caso de la vegetación sana y vigorosa, esta va a emitir una baja reflectividad en el espectro visible, aunque con un pico en el verde debido a la clorofila. Es decir, cuando se realiza completamente la fotosíntesis, tendremos una mayor reflectividad en la banda verde. La reflectividad va a ser muy alta en el infrarrojo cercano debido a la escasa absorción de energía por parte de las plantas en esta banda. En cambio, cuando la clorofila tiene una influencia menor (por ejemplo, en el otoño, cuando las hojas pierden los cloroplastos), la reflectividad en la banda verde va a disminuir, aumentando en la roja ya que deja de ser la clorofila el pigmento principal y las plantas adquieren un color pardo-amarillento.

Por otro lado, en la vegetación enferma, observaremos una reducción en la región del infrarrojo cercano y un incremento en la reflectividad en las bandas roja y azul. Además, podremos apreciar que la reflectividad de una planta está directamente relacionada con su contenido de agua. A medida que el contenido de agua aumenta, la reflectividad disminuye, ya que se intensifica la absorción de radiación por parte del agua presente en la planta.

Por tanto, de manera general, se puede concluir que la vegetación que presenta mayor salubridad es aquella en la que existe una mayor diferencia entre el rojo y el infrarrojo cercano. De manera contraria, la vegetación más enferma presentará valores de reflectividad poco variables entre el rojo y el infrarrojo cercano [10].

2.4 Satélites de Teledetección: Planet

A continuación, vamos a analizar la plataforma satelital de Planet, al ser la utilizada en la elaboración de este TFG.

Planet, es una innovadora empresa destacada en el área de la observación de la Tierra desde el espacio. Fue fundada en 2010 y desde entonces ha revolucionado la industria de la teledetección mediante el lanzamiento de una constelación de satélites CubeSats, conocidos como Doves. Estos satélites, entre ellos, los SuperDove, en los cuales nos

centraremos en este trabajo, ofrecen imágenes de alta resolución, capturando datos de manera frecuente y sistemática [11].

Planet proporciona información global actualizada y accesible, por tanto, empresas, gobiernos, particulares y otras organizaciones pueden utilizar estas imágenes para diversas aplicaciones, en nuestro caso, el análisis de la vegetación de la isla de La Palma.

2.4.1 Constelación PlanetScope

Planet opera con las constelaciones PlanetScope (PS) y RapidEye (RE). En este TFG, nos centraremos en la constelación PlanetScope.

Debido a que esta constelación consta de múltiples lanzamientos de satélites individuales o grupos, constantemente se mejora la capacidad de la órbita, lo que provoca el progreso tecnológico permanente de la misma.

Los satélites de PlanetScope, conocidos como Dove, tienen forma CubeSats (dimensiones de 10 cm 10 cm 30 cm). Estos son satélites pequeños y modulares, pues están diseñados para ser eficientes y permitir el lanzamiento de varios de ellos en una única misión. La constelación completa consta de aproximadamente 120 satélites, capaces de tomar imágenes de toda la superficie terrestre, todos los días del año [12].

2.4.2 Sensores SuperDove

Desde el primer lanzamiento en 2014, se han mandado tres tipos de sensores PlanetScope: DoveClassic, DoveR y SuperDove. En nuestro caso, estaremos trabajando con este último.



Figura 2.7. Sensor SuperDove [13].

SuperDove (PSB.SD) está construido con un telescopio (denominado PSB) con un sensor de 47 megapíxeles y un filtro paso banda. Es capaz de capturar las 8 bandas: roja, verde, azul e infrarrojo cercano, así como cuatro nuevas bandas adicionales: Red Edge, Green I, Yellow y Coastal Blue.

En la figura 2.8 se muestra la representación de las diferentes bandas espectrales.

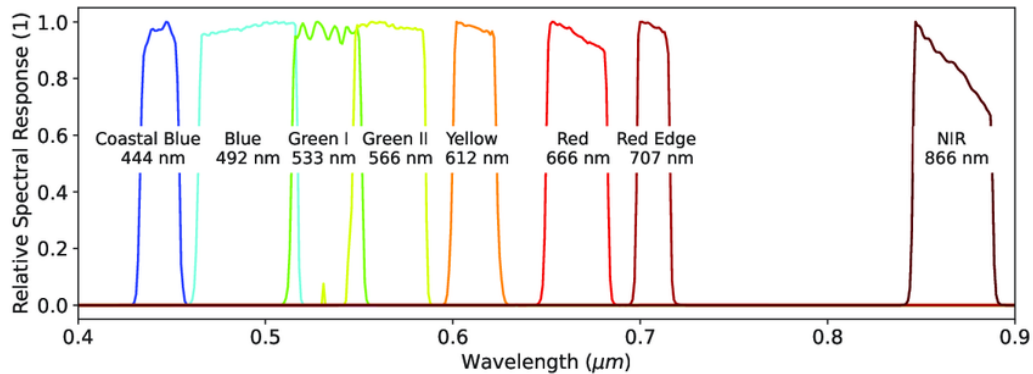


Figura 2.8. Bandas espectrales de los satélites SuperDove de Planet [14].

Las escenas producidas abarcan aproximadamente 32.5 x 19.6 km². Según el monitoreo actual, las imágenes más antiguas disponibles datan de mediados de marzo de 2020. Cada cuadro consta de ocho franjas, como podemos ver a continuación. Para generar la imagen final de 8 bandas, apilamos varios fotogramas consecutivos a cada lado de un fotograma determinado. Esto se puede ver en la Figura 2.9.

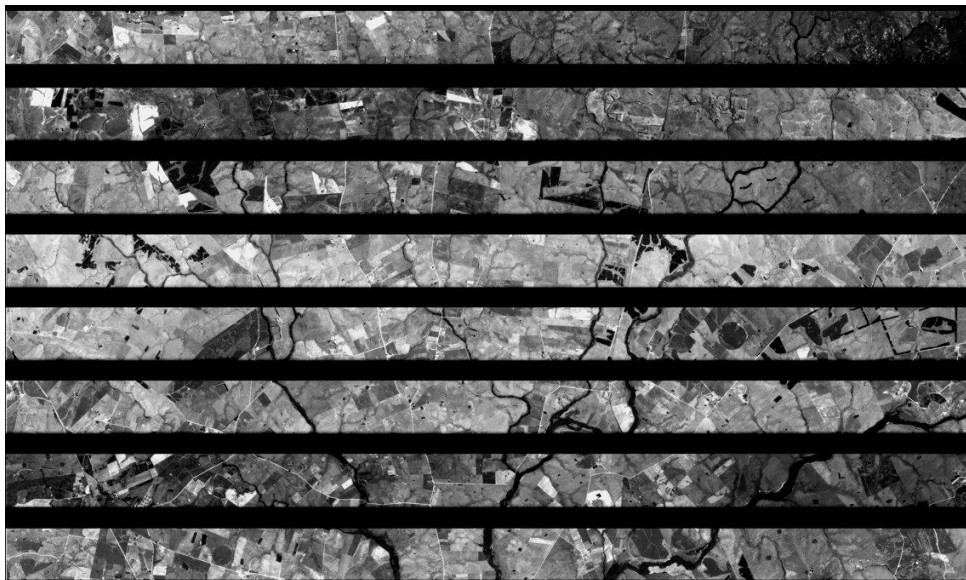


Figura 2.9. Escena producida por un sensor SuperDove [15].

Por tanto, podemos concluir que las ventajas que presenta el sensor SuperDove respecto a otros satélites son:

- Alta frecuencia de captura de imágenes. Esto nos va a permitir un monitoreo más constante en determinadas áreas de estudio.
- Ofrecen una resolución espacial bastante significativa. Vamos a obtener imágenes muy detalladas de la superficie de la Tierra.
- Son formato CubeSat, lo que permite la implementación de una constelación de numerosos satélites reduciendo costes y optimizando el espacio.
- Capturan datos en varias bandas espectrales, haciendo que incremente el número de aplicaciones.

Tabla 2.1. Especificaciones técnicas.

Detalles del Sensor SuperDove y sus Especificaciones Técnicas [16]	
Tipo De Sensor	SuperDove
Bandas Espectrales	Coastal Blue: 431 - 452 nm Blue: 465 – 515 nm Green I: 513 - 549 nm Green: 547 – 583 nm Yellow: 600 - 620 nm Red: 650 – 680 nm RedEdge: 697 – 713 nm NIR: 845 – 885 nm
Distancia De Muestreo En Tierra (nadir)	3.7 m
Tamaño Del Fotograma	32.5 km x 19.6 km aprox.
Cobertura Máxima De Imágenes Por Órbita	20,000 km ²
Tiempo De Retorno	Diario en nadir
Capacidad De Captura De Imágenes	200 million km ² /día

2.5 Preprocesado de Imágenes Multiespectrales

La radiación reflejada desde la superficie que llega al sensor experimenta una transformación a un valor digital, que se corresponde con un píxel en la imagen adquirida. Este proceso de formación de la imagen digital se lleva a cabo para todas las bandas, resultando en una matriz tridimensional. En esta matriz, el valor de cada posición (fila, columna y banda) representa el nivel digital del píxel. Este enfoque da origen al concepto de imagen multiespectral, donde cada banda se convierte en una

representación de datos específicos, los cuales pueden visualizarse de forma individual o en combinación con otras [17].

En este TFG, se trabajará con datasets basados en píxeles, lo que comúnmente se conoce como ráster. Por tanto, que un ráster sea un modelo de datos basado en píxeles, implica que cada píxel contiene un valor en una matriz de filas y columnas, como se mencionó anteriormente. Esta es una representación bidimensional genérica.

Este ráster define los píxeles (celdas) en filas y columnas, el número de bandas y la profundidad de bits que compone la imagen, una vez que el sensor capture una o varias bandas de imágenes, cada una con un intervalo de longitud de onda específico en el espectro electromagnético.

El término “píxel” hace referencia a la unidad más pequeña de información de una imagen o datos ráster. Estos almacenan una dimensión y un valor. La resolución de este píxel determina lo que se puede resolver en una imagen. Los sensores de teledetección tienen diferentes tipos de resolución [18]:

- **Resolución espacial:** es la dimensión del área de terreno representada por un solo píxel.
- **Resolución espectral:** describe la longitud de onda dentro del espectro electromagnético que se usa para crear la imagen.
- **Resolución radiométrica:** capacidad de un sensor de distinguir objetos vistos en la misma parte del espectro electromagnético. Es decir, hace alusión al número de bits usado para codificar la reflectividad de cada píxel.
- **Resolución temporal:** hace referencia a la frecuencia con la que se capturan imágenes del mismo lugar en la superficie de la Tierra.

Como se mencionó al principio de este apartado, vamos a estar analizando imágenes multiespectrales, lo que se conoce también como rásteres multibanda. Los rásteres tienen una o varias bandas o canales designados por un rango concreto de longitudes de onda.

Es importante resaltar que, para abordar un de la salud y vigorosidad vegetal del Parque Nacional de la Caldera de Taburiente, es esencial hacer un análisis multitemporal. Esta comparación facilita la evaluación de la evolución temporal, proporcionando

información valiosa para el análisis de cambios significativos según sea necesario en el contexto de la investigación.

Toda imagen capturada por un sensor remoto ya sea desde una plataforma aérea o espacial, presentan una serie de alteraciones radiométricas y geométricas atribuibles a diversos factores. Esto conlleva a que la imagen detectada no concuerde de manera precisa con el tono, posición, forma y tamaños reales de los objetos que contiene. En el contexto específico de las imágenes espaciales, estas deformaciones pueden ser debidas a [19]:

- Distorsiones originadas por la plataforma.
- Distorsiones provocadas por la rotación terrestre.
- Distorsiones provocadas por el sensor.
- Distorsiones provocadas por la atmósfera.

Muchos de estos problemas se solventan de forma rutinaria en los centros encargados de la recepción de imágenes. Sin embargo, algunos de ellos persisten haciendo precisas una serie de técnicas de ajuste. Por ejemplo, la aplicación de correcciones radiométricas es esencial tanto para la modelación de parámetros físicos a partir de la imagen, como para la realización de estudios multitemporales. En este último caso las correcciones geométricas también son imprescindibles, así como cuando se busca establecer una relación entre la imagen y algún tipo de información adicional.

A continuación, se presentan estas dos principales correcciones que se ha mencionado anteriormente:

2.5.1 Correcciones Radiométricas

La corrección radiométrica implica, por una parte, la restauración de líneas o píxeles perdidos y por otra la corrección del bandeo de la imagen.

- **Píxeles o líneas perdidas:** Si se ha perdido el valor de algún píxel la solución más simple sería estimarlo como la media de los valores del mismo píxel en las líneas anterior y posterior (no es recomendable utilizar los píxeles contiguos de la misma línea por que han sido captados por el mismo detector que ha dado el fallo, por tanto, pueden ser poco fiables).

15	18	17	18	22	31
15	16	18	19	21	28
19	17	19	20	23	25
26	19	24	118	27	24
31	23	29	32	33	28
33	35	33	36	34	30

➔

15	18	17	18	22	31
15	16	18	19	21	28
19	17	19	20	23	25
26	19	24	25	27	24
31	23	29	32	33	28
33	35	33	36	34	30

Figura 2.12. Corrección radiométrica de píxeles o líneas perdidas.

Para detectar líneas perdidas se compara la media de los ND de una línea con las medias de las líneas anterior y posterior, para detectar píxeles perdidos se compara habitualmente el valor de un píxel con los de los 8 píxeles vecinos mediante algún procedimiento de filtrado [20].

- **Bandeo:** El fenómeno del bandeo se debe a una mala calibración entre detectores y resulta especialmente visible en las zonas de baja radiancia (zonas marinas, por ejemplo). El resultado es la aparición periódica de una banda más clara u oscura que las demás.

Para corregir el bandeo se asume que, en caso de no haber error, los histogramas obtenidos por cada uno de los detectores serían similares entre sí y similares al histograma global de la imagen que se toma como referencia.

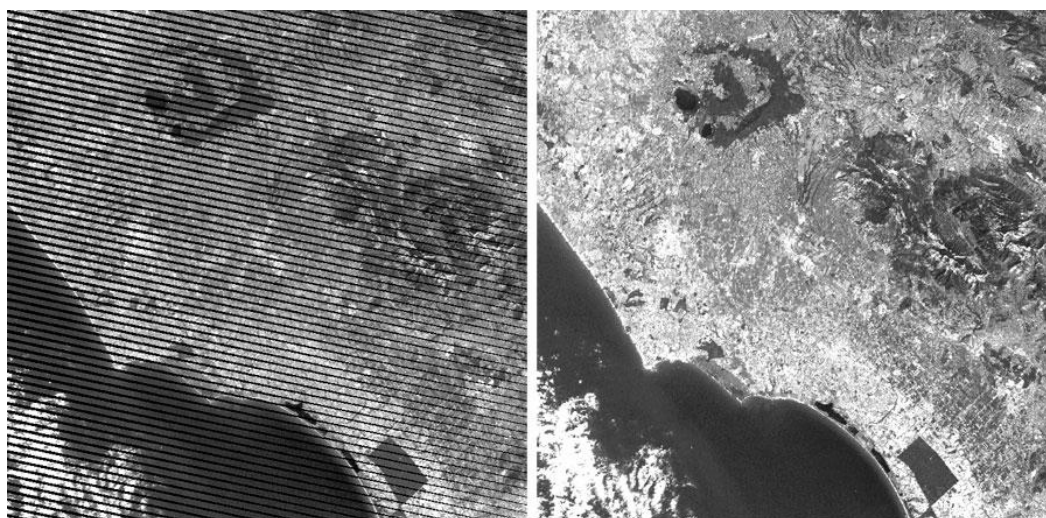


Figura 2.13. Corrección radiométrica por bandeo [21].

La corrección radiométrica trata de corregir problemas mecánicos en el sensor que generan valores erróneos en píxeles concretos, sin embargo, estos errores pueden

deberse a perturbaciones atmosféricas. En este punto debemos evaluar y eliminar las distorsiones que la atmósfera introduce en los valores de radiancia que llegan al sensor desde la superficie terrestre, para ello, nos basaremos en la **corrección atmosférica**.

La radiación electromagnética experimenta notables alteraciones debido a los diversos componentes presentes en la atmósfera. La presencia de aerosoles y vapor de agua ocasiona una dispersión selectiva de la radiación que se propaga entre la superficie terrestre y el sensor. Como resultado, la radiancia registrada por el sensor no refleja de manera exacta la radiación emitida por la superficie terrestre, sino que incluye un porcentaje adicional debido al efecto dispersivo de la atmósfera. La dispersión atmosférica no es constante en la imagen, ya que determinadas zonas pueden haber sido más afectadas que otras, en función de la diversa presencia de aerosoles o vapor de agua.

Esta corrección puede ser muy interesante cuando se realicen estudios multitemporales, como es nuestro caso, puesto que la dispersión sufrida por una imagen no es comparable a la que experimenta otra adquirida en distinta fecha.

A continuación, se muestra una figura donde es posible apreciar el efecto de aplicar correcciones atmosféricas a una imagen satelital.



Figura 2.14. Corrección Atmosférica [22].

2.5.2 Correcciones Geométricas

Este concepto incluye cualquier cambio en la posición que ocupan los píxeles de una imagen. Al contrario que las correcciones radiométricas, aquí no se pretende modificar

los niveles digitales de los píxeles de la imagen, sino solo su posición, es decir, sus coordenadas.

Estos problemas de distorsión geométrica pueden ser debidos a:

- Distorsión originada por la plataforma de toma.
- Distorsión provocada por la rotación de la tierra.
- Distorsión panorámica.
- Distorsión de oblicuidad.
- Distorsión que provoca la curvatura de la superficie terrestre.
- Distorsión por efecto del relieve.

Las correcciones geométricas tienen como objetivo reconstruir la geometría de la imagen original, de manera que se adapte a una proyección cartográfica y a un sistema de coordenadas elegido. Esto es lo que se conoce como proceso de georreferenciación.

Una imagen de satélite no proporciona información georreferenciada. En ella, cada píxel se ubica en un sistema de coordenadas arbitrario de tipo fila-columna. Este proceso conlleva la transformación de las coordenadas de los píxeles de la segunda imagen de tal forma que coincidan de manera precisa con las de la primera (imagen de referencia). Se realiza habitualmente mediante una transformación polinomial de segundo grado que se obtiene a partir de un conjunto de pares de puntos de control de ambas imágenes.

A continuación, se muestra una figura donde es posible ver el resultado de aplicar este tipo de correcciones:

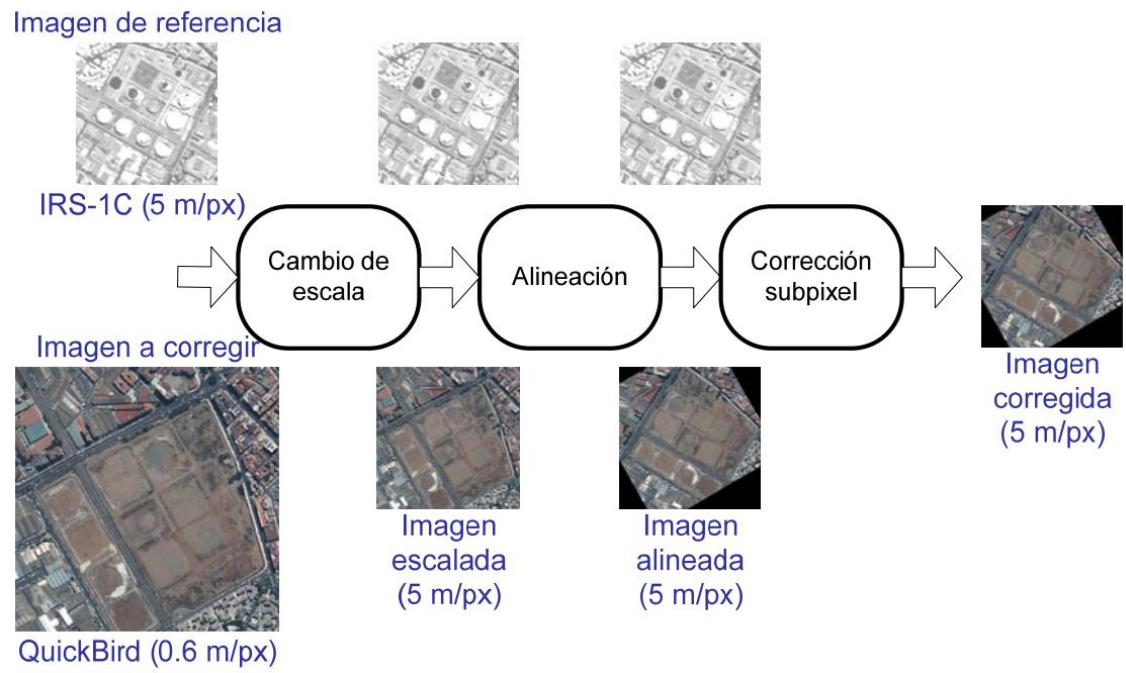


Figura 2.15. Esquema general del procedimiento de corrección geométrica previo a la detección de cambios [23].

Capítulo 3: La vegetación de La Palma e introducción a los índices de vegetación.

El capítulo se divide en dos partes. En primer lugar, se describe la vegetación de la isla de La Palma, destacando su diversidad, el gradiente altitudinal y la presencia de ecosistemas representativos, como los cardonales, laurisilvas y pinares, especialmente visibles en el Parque Nacional de la Caldera de Taburiente. Esto permite comprender la distribución y las condiciones que determinan la fenología de la isla.

En la segunda parte, se introducen los índices de vegetación, parámetros derivados de la reflectancia espectral utilizados para cuantificar y analizar la salud y densidad de la vegetación mediante la teledetección. Se presentan diferentes tipos de índices y sus principales aplicaciones.

Ambas partes se relacionan directamente, ya que el conocimiento de la diversidad y estructura de la vegetación de La Palma proporciona el contexto para interpretar los índices de vegetación, los cuales permiten analizar y comparar dichas formaciones de manera objetiva a partir de imágenes satelitales.

3.1 Vegetación de la isla de La Palma

La vegetación canaria se caracteriza por tener una gran diversidad, además de un grado de endemidad muy alto. Las formaciones vegetales más características del archipiélago, paisajísticamente hablando, presentan su propio carácter zonal. Esto es, aparecen dispuestas en diferentes bandas altitudinales [24].

La isla de La Palma, a pesar de tener una superficie muy limitada, de aproximadamente 706 km², presenta una gran altitud, 2.423 metros. Esto hace posible la existencia en ella de prácticamente todos los ecosistemas zonales de Canarias. La isla posee una amplia variedad de pisos bioclimáticos, algunos sometidos a la presencia de los alisios, lo que los hace más húmedos y lluviosos, y otros más secos como los del Sur y el Oeste insular.

Estos pisos de vegetación, cada uno caracterizado por condiciones climáticas y ecológicas específicas, contribuyen a la singularidad del ecosistema de la isla y se reflejan especialmente en el Parque Nacional de la Caldera de Taburiente, una de las áreas protegidas más destacadas de La Palma [25].

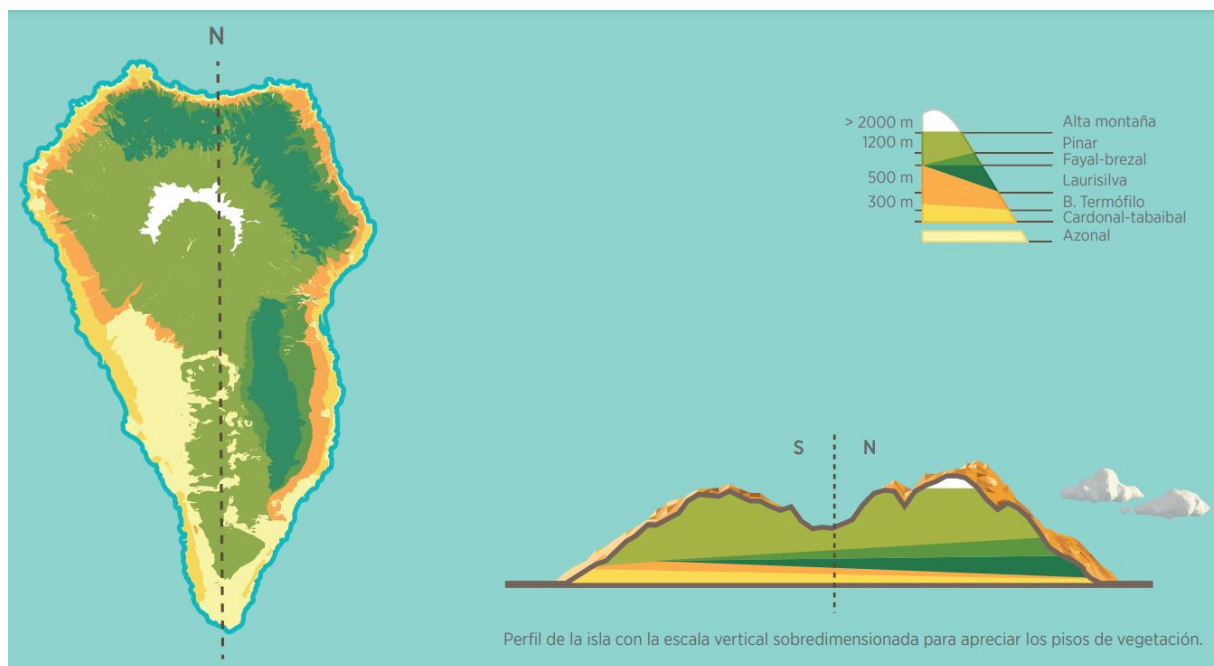


Figura 3.1. Pisos de vegetación de La Palma [26].

A continuación, se presenta una breve descripción de la vegetación existente en cada uno de estos pisos:

- **Cardonal-tabaibal.** En las zonas costeras de La Palma, la vegetación se adapta a condiciones más cálidas y secas. Es común encontrar especies como el tabaibal-cardonal, donde destacan plantas como el cardón (*Euphorbia canariensis*) y la tabaiba (*Euphorbia balsamifera*), que han desarrollado adaptaciones para resistir la salinidad del entorno [27]. Otras especies que conviven en este piso son las que se muestran en la siguiente figura:

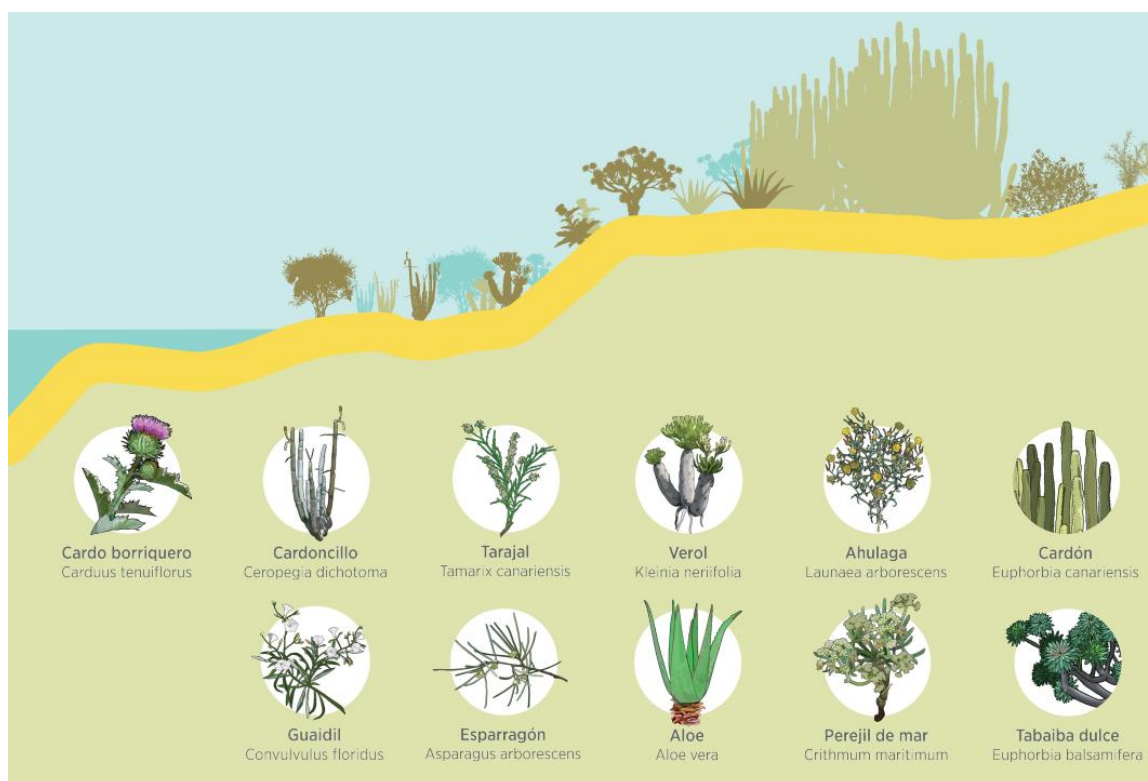


Figura 3.2. Vegetación que compone el Cardonal-tabaibal [26].



En esta figura se muestra la diversidad del tabaibal-cardonal en las costas de La Palma. Se puede observar la aridez de este paisaje costero, donde el cardón y la tabaiba son los grandes protagonistas.

Figura 3.3. Cardonal-tabaibal en La Palma [28].

- **Bosque termófilo.** A medida que ascendemos, nos encontramos con el bosque termófilo entre los 200 y 600 metros de altitud. Estos bosques conforman un suelo verde que se extiende por laderas y barrancos, donde predominan especies como las Palmeras [29].

Otras especies que conviven en este piso son las que se muestran en la siguiente figura:

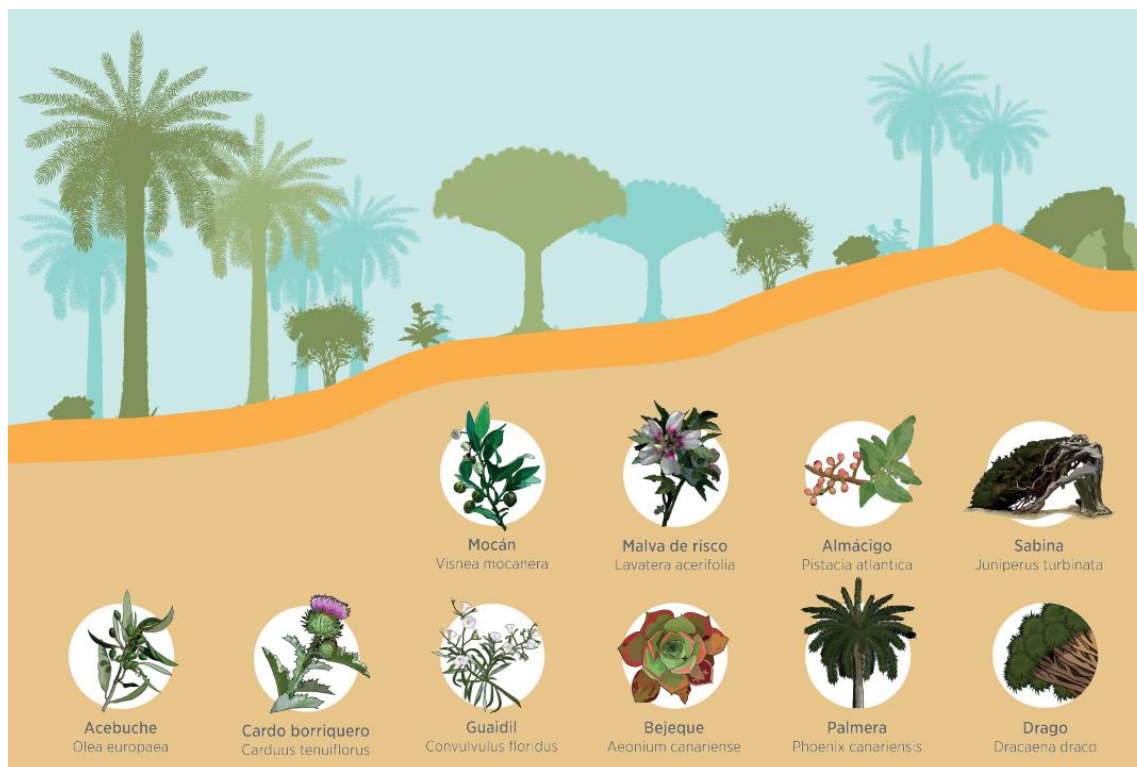


Figura 3.4. Vegetación que compone el Bosque termófilo [26].



Figura 3.5. Bosque termófilo en La Palma [30].

La imagen adjunta nos muestra parte del bosque termófilo de La Palma. Donde las palmeras y los dragos son los grandes protagonistas. Se revela la adaptabilidad de estas especies a las condiciones termófilas.

- **Laurisilva.** El piso de laurisilva abarca altitudes entre 600 y 1,000 metros. Este ecosistema húmedo y fresco alberga árboles como el laurel (*Laurus novocanariensis*) y la faya, así como helechos y musgos. La constante humedad y las nieblas favorecen el desarrollo de una rica biodiversidad, con numerosas aves endémicas que encuentran refugio en este entorno [31]

Otras especies que conviven en este piso son las que se muestran en la siguiente figura:

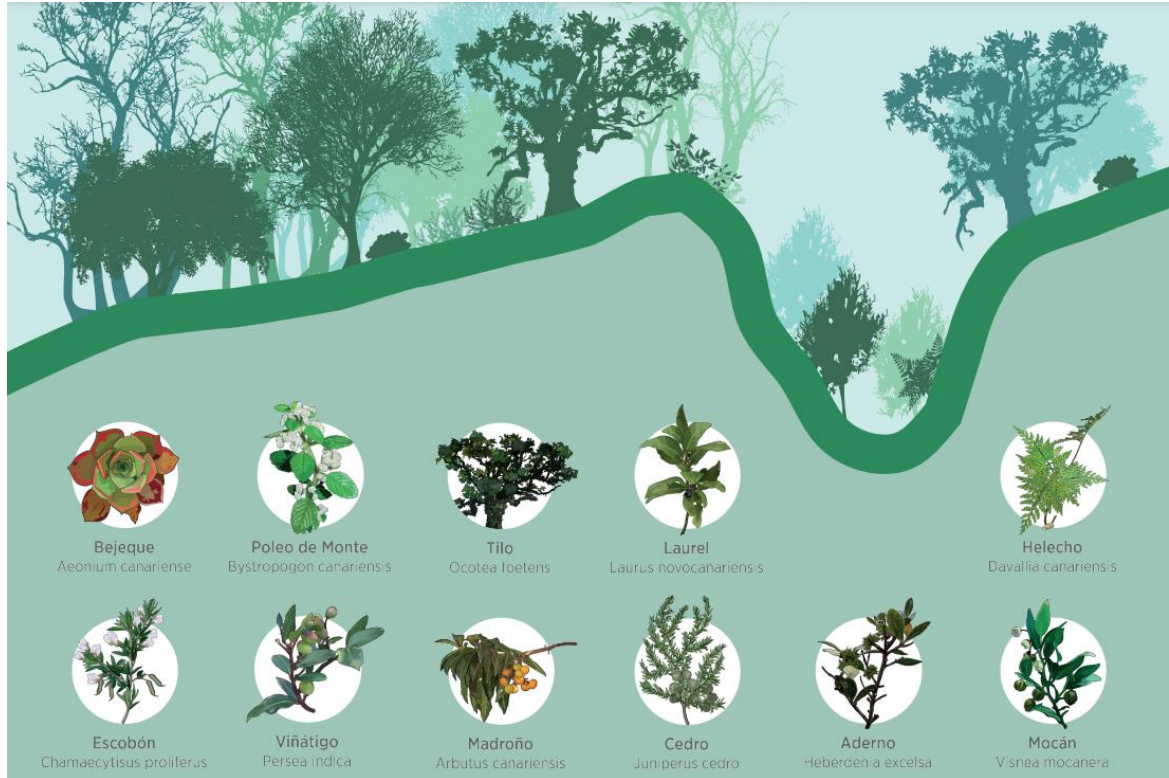


Figura 3.6. Vegetación que compone la Laurisilva [26].



La foto muestra un ejemplo de bosque de la laurisilva. El suelo está cubierto de musgo y los helechos, con sus grandes hojas, cubren el bosque con diferentes tonos de verde.

Figura 3.7. Laurisilva en La Palma [32].

- **Fayal-brezal.** En altitudes intermedias, antes de llegar al piso de bosques de pino canario, se extiende el bosque de fayal-brezal. Este ecosistema está dominado por fayas (*Myrica faya*) y brezos (*Erica arborea*), creando un denso dosel verde. El fayal-brezal es esencial para mantener la biodiversidad y actúa como hábitat para aves endémicas como el pinzón azul (*Fringilla teydea*) [31].

Otras especies que conviven en este piso son las que se muestran en la siguiente figura:

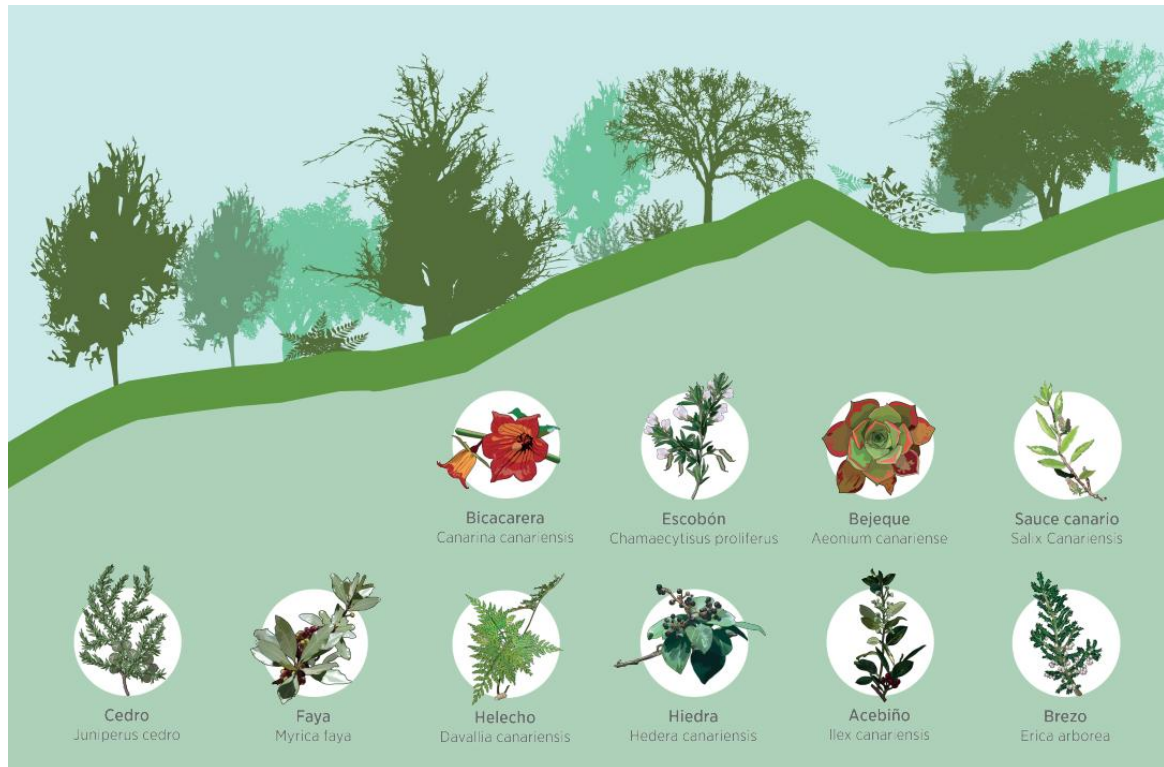


Figura 3.8. Vegetación que compone el Fayal-brezal [26].



Figura 3.8. Fayal-breza en La Palma [33].

En esta imagen se puede ver que las fayas tienen muchas ramas densas con hojas de forma ovalada y color verde oscuro. Por otro lado, los brezos, que tienen tallos rectos y hojas largas y delgadas, forman parte de la capa de arbustos en el bosque.

- **Pinar.** A medida que ascendemos en altitud, el bosque de fayal-brezal da paso a los bosques de pino canario (*Pinus canariensis*), que caracterizan las altitudes medias del Parque. Estos bosques desempeñan un papel crucial en la conservación del suelo, ya que las raíces de los pinos ayudan a prevenir la erosión en las pendientes pronunciadas de la caldera. Entre las especies que coexisten en este piso se encuentran el codeso (*Adenocarpus viscosus*) y la retama (*Retama rhodorhizoides*), plantas adaptadas a suelos volcánicos [34].

Otras especies que conviven en este piso son las que se muestran en la siguiente figura:



Figura 3.10. Vegetación que compone el Pinar [26].



La imagen destaca la estructura densa y regular del dosel del bosque de pinar, con árboles alineados y troncos rectos que caracterizan esta formación.

Figura 3.11. Pinar de La Palma [35].

- **Alta montaña.** En las cumbres y roques del Parque Nacional, la vegetación se vuelve más escasa y adaptada a condiciones extremas. Aquí, líquenes y musgos colonizan las superficies rocosas, mostrando una resistencia impresionante a los fuertes vientos y las variaciones de temperatura. Pequeñas gramíneas alpinas, como *Festuca francoi*, son capaces de prosperar en este entorno [36].

Otras especies que conviven en este piso son las que se muestran en la siguiente figura:



Figura 3.12: Vegetación que compone la Alta Montaña [26].



La disposición dispersa de los cedros en la imagen refleja la adaptación de esta especie a condiciones de suelo más áridas. A nivel del suelo, se observa hojarasca y material orgánico

Figura 3.13: Cedro en La Palma [37].

El Parque Nacional de la Caldera de Taburiente se encuentra en el corazón de la isla de La Palma, designada como una Reserva de la Biosfera en el archipiélago de las Islas Canarias. Este paraje, de origen volcánico, presenta una inmensa depresión rodeada por pronunciadas elevaciones, evocando la configuración de un cráter o caldera volcánica. Destaca por su circo de cumbres con un diámetro de 8 kilómetros y desniveles que superan los 1500 metros. El punto más alto es el Roque de los Muchachos, alcanzando los 2.426 metros sobre el nivel del mar. Declarado Parque Nacional en 1954, sus barrancos y alturas acogen una extraordinaria vegetación, con representantes de endemismos canarios, como se detalló anteriormente [38].



Figura 3.14: Mapa límites Parque Nacional de La Caldea de Taburiente [39].

El Parque Nacional de la Caldera de Taburiente abarca una parte significativa de la isla de La Palma, pues ocupa una gran porción del interior montañoso. La extensión del parque incluye áreas como Los Llanos de Aridane, El Paso, y otros municipios circundantes. Sin embargo, es importante señalar que, aunque el parque es extenso y ejerce una gran influencia en el paisaje central de La Palma, no abarca la totalidad de la isla. La costa y otras áreas periféricas no están directamente dentro de los límites del parque nacional. Es por ello, que no todos los pisos de vegetación detallados

anteriormente forman parte del Parque Nacional de la Caldera de Taburiente, quedando excluidos los pisos de vegetación más bajos.

El número total de especies de flora presentes en el Parque Nacional asciende a 1.451, de las cuales 994 son criptógamas (447 líquenes, 27 hongos liquenícolas, 177 briófitos y el resto son hongos) y 457 fanerógamas (28 de ellas cultivadas) [40].

En La Caldera de Taburiente, la vegetación no solo constituye una impresionante característica paisajística, sino que también desempeña un papel crucial en el mantenimiento del equilibrio ecológico de este ecosistema único. La conservación de este patrimonio natural es esencial para preservar la riqueza botánica y faunística que lo define [41].

3.2 Índices de Vegetación

Tras analizar la composición, distribución y características de la vegetación de la isla de La Palma, es necesario tener herramientas que permitan cuantificar y monitorizar estos patrones de manera objetiva y a lo largo del tiempo. La variabilidad fenológica observada en los distintos ecosistemas puede ser estudiada mediante técnicas de teledetección, aprovechando la información contenida en las distintas bandas espectrales. En este caso, los índices de vegetación son uno de los métodos más eficaces para evaluar el estado, densidad y el comportamiento temporal de la vegetación, proporcionando una base que complementa lo anteriormente descrito.

La información proporcionada por imágenes multibanda capturadas por satélites requiere ser categorizada y agrupada para facilitar la diferenciación entre áreas con características distintivas. Una manera efectiva de llevar a cabo esta clasificación o agrupamiento es a través de la creación de índices.

Un Índice de Vegetación, puede ser definido como un parámetro calculado a partir de los valores de la reflectancia a distintas longitudes de onda, y que es particularmente sensible a la cubierta vegetal. Además, se refiere a un valor generado mediante la combinación de diversas bandas espectrales y que guarda una posible correlación con la cantidad y vigor de vegetación en un píxel específico. Estos índices se emplean con el fin de mejorar la diferenciación entre el suelo y la vegetación, disminuyendo la influencia del relieve en la descripción espectral de las diversas coberturas.

Los índices de vegetación generalmente muestran valores bajos para áreas con vegetación menos vigorosa y valores altos para áreas con vegetación más saludable. No obstante, en situaciones particulares, como en los casos de los índices RVI y NRVI, la relación es inversa, lo que significa que, a mayores valores del índice, menor cantidad de vegetación presente en el área. Por lo tanto, se aconseja obtener información detallada al interpretar estos índices para comprender adecuadamente su comportamiento específico [42].

Los índices suelen usar las bandas del RED y del NIR, pues el comportamiento de la vegetación es muy singular en esas bandas, como se muestra en la figura 3.1.

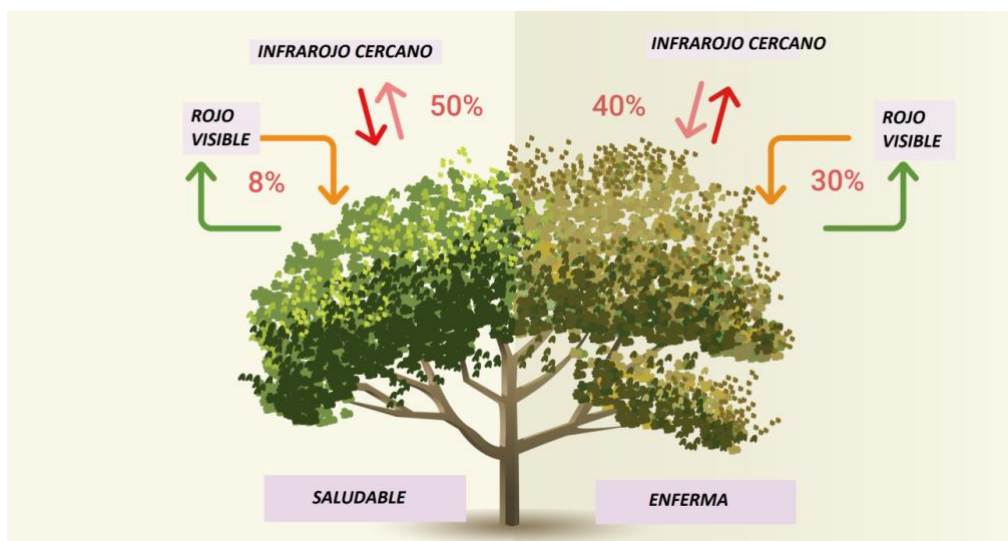


Figura 3.15. Reflectancia en el Rojo y en el IR cercano de la vegetación sana y enferma [43].

A continuación, se detallan aquellos índices que en principio podrían ser útiles en este TFG. Se han agrupado en función de sus características como índices de banda ancha y banda estrecha.

3.2.1 Índices de Banda Ancha

Los índices de vegetación de banda ancha utilizan información de múltiples bandas, como el rojo, el infrarrojo cercano (NIR), y en algunos casos, el infrarrojo de onda corta (SWIR). La inclusión de múltiples bandas amplias permite obtener una visión más completa de la respuesta espectral de la vegetación. Es decir, ofrecen una evaluación general de la salud y la densidad de la vegetación, considerando la reflectividad en diferentes partes del espectro electromagnético.

- NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*)

El NDVI es el índice de vegetación más común en teledetección. Es uno de los más adecuados para seguir la dinámica de desarrollo de la vegetación, ya que mide la biomasa fotosintéticamente activa de las plantas, por lo que es muy útil para obtener una medida del verdor de la zona vegetal que se quiere analizar.

$$NDVI = \left(\frac{NIR - RED}{NIR + RED} \right) \quad (3.1)$$

Su sencillez de cálculo y disponer de un rango de variación fijo (entre -1 y $+1$), permite establecer umbrales y comparar imágenes:

- Menor de 0,1: Áreas rocosas, arenosas o nevadas.
- Entre 0,2 a 0,3: Áreas pobres con arbustos o pastos naturales.
- Mayor de 0,3: Praderas, cultivos, bosques etc. dependiendo el valor alcanzado.

Este índice se satura si existe una alta densidad vegetal o si la imagen está afectada por efectos atmosféricos.

Por ejemplo, a continuación, se muestra una imagen de este índice para conocer la vigorosidad del cultivo, donde el sensor ha captado unos valores del RED y NIR de forma numérica (reflectancias medibles) y un programa informático calcula en cada punto de la imagen el NDVI operando con esas reflectancias. Después le asigna una gama de colores para que podamos interpretar esa imagen mediante el resultado colorimétrico. Si rojo es 0 y verde es 1 y entre esos valores asignamos una gama cromática: cerca del 1 (verde) el NDVI nos da alto y cerca del cero (rojo) será un valor bajo.

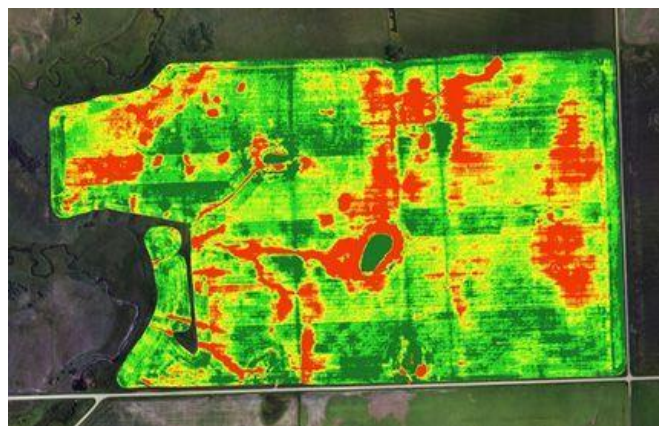


Figura 3.16: Índice NDVI [44].

- EVI (*Enhanced Vegetation Index*)

Este índice ajusta los resultados del NDVI a los ruidos atmosféricos y del suelo, especialmente en las zonas de vegetación densa, así como para mitigar la saturación en la mayoría de los casos, es decir, correcciones para superficies con elevada reflectividad.

Se introducen en la expresión las constantes $C1 = 6$ y $C2 = 7,5$ con la función de corregir los efectos atmosféricos y la constante $L = 1$ para suplir los efectos negativos de la reflectividad del suelo.

$$EVI = 2,5 * \frac{NIR-RED}{(NIR + C1 * RED - C2 * BLUE + L)} \quad (3.2)$$

El rango de valores del EVI es de -1 a +1, y para la vegetación sana, varía entre 0,2 y 0,8.

- GEMI (*Global Environment Monitoring Index*)

Diseñado para mejorar la sensibilidad a cambios en la cobertura vegetal y reducir la influencia del fondo del suelo. Es similar a NDVI, pero es menos sensible a los efectos atmosféricos. Está afectado por el terreno desnudo, por lo tanto, se recomienda su uso en áreas de vegetación escasa o moderada.

$$GEMI = \eta * (1 - 0.25 * \eta) - \left(\frac{RED - 0.125}{1 - RED} \right) \quad (3.3)$$

donde:

$$\eta = \frac{2 * (NIR^2 - RED^2) + 1.5 * NIR + 0.5 * RED}{NIR + RED + 0.5} \quad (3.4)$$

- GNDVI (*Green Normalized Difference Vegetation Index*)

Similar al NDVI, pero utiliza la banda verde en lugar de la banda roja. GNDVI es un índice del “verdor” de la planta o actividad fotosintética. Es uno de los índices de vegetación más utilizados para determinar la captación de agua y nitrógeno en el dosel de la vegetación, por tanto, el GNDVI mide el contenido de clorofila con mayor precisión que el NDVI.

Los valores arrojados por dicho índice oscilan entre -1 y 1. Valores entre -1 y 0 están asociados a la presencia de agua o suelo desnudo.

$$GNDVI = \frac{NIR - GREEN}{NIR + GREEN} \quad (3.5)$$

A continuación, se muestra una imagen a la que se le ha aplicado este índice.



Figura 3.17: Índice GNDVI [45].

- SR (*Simple Ratio*)

El método SR, es un índice de vegetación común empleado para realizar estimaciones de la cantidad de vegetación. Trata la luz difundida en la banda NIR y absorbida en la banda roja, lo que reduce los efectos de la atmósfera y la topografía. El SR se calcula mediante la relación entre la reflectancia en la región del infrarrojo cercano (NIR) y la reflectancia en la región del rojo.

$$SR = \frac{NIR}{RED} \quad (3.6)$$

Sus valores oscilan en los siguientes rangos:

- Vegetación densa y saludable: valores entre **8 y 20**. Una vegetación vigorosa refleja mucho en el NIR y absorbe fuertemente en el rojo debido a la clorofila.
- Vegetación moderada: valores entre **3 y 8**. Indica áreas con vegetación menos densa o con cierto nivel de estrés.
- Vegetación degradada o escasa: valores entre **1 y 3**. Se observa en plantas enfermas, secas o con baja cobertura vegetal.

- Suelos desnudos y áreas sin vegetación: valores cercanos a 1 o ligeramente superiores, ya que el suelo refleja de manera similar en ambas bandas.
- Cuerpos de agua: valores menores a 1, debido a que el agua absorbe fuertemente en NIR y refleja poco en el rojo.

- MSR (*Modified Simple Ratio*)

Este índice simplemente es una versión mejorada del índice Simple Ratio (SR) que reduce la sensibilidad a variaciones en la densidad de la vegetación.

$$MSR = \frac{\left(\frac{NIR}{RED}\right) - 1}{\left(\sqrt{\frac{NIR}{RED}}\right) + 1} \quad (3.7)$$

Sus valores típicos son:

- Vegetación densa y saludable: valores entre 0.8 y 2. Reduce la sobreestimación en áreas con alta biomasa.
- Vegetación moderada: valores entre 0.3 y 0.8. Representa vegetación menos densa o con cierto estrés.
- Vegetación escasa o degradada: valores entre 0 y 0.3. Indica plantas enfermas, secas o baja cobertura vegetal.
- Suelos desnudos y áreas sin vegetación: valores cercanos a 0, ya que la reflectancia en NIR y rojo es similar.
- Cuerpos de agua: valores negativos o cercanos a 0, debido a la fuerte absorción en NIR.

- SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*)

Este índice tiene en cuenta la reflectividad del suelo y permite aislar la información que aporta la vegetación, de la que procede del suelo que está bajo ella. Al usar este índice, dos coberturas vegetales de igual actividad fotosintética, pero sobre suelos muy diferentes, aparecerán con igual (o muy similar) índice SAVI, a diferencia de lo que puede suceder en el NDVI clásico.

Para lograr el objetivo de separar las radiancias del suelo y la vegetación, se añadió una constante L al denominador del NDVI, donde L puede tomar valores entre 0 y 1,

dependiendo de la densidad de la vegetación (valores más altos del índice, para densidades más bajas). Para mantener el mismo rango de variación que el NDVI, el resultado debe multiplicarse por $1 + L$.

Huete (1988) [46], basándose en un modelo de transferencia radiativa, mostró que un valor de $L = 0.5$ permitía mejorar el ajuste, especialmente, para densidades intermedias de vegetación y sobre todo porque un valor de $L = 0$ produce el mismo resultado que el NDVI y si L vale 1, el resultado es equivalente al PVI (*Perpendicular Vegetation Index*), que en lugar de relacionar bandas, calcula la distancia perpendicular entre un punto (RED, NIR) y la línea del suelo (“soil line”) en el espacio espectral rojo - infrarrojo cercano.

$$SAVI = \left(\frac{NIR - RED}{NIR + RED + L} \right) * (1 + L) \quad (3.8)$$

Por tanto, este índice es útil donde la vegetación es dispersa. Para el análisis de vegetación joven, regiones áridas con vegetación escasa (menos del 15% del área total) y superficies expuestas del suelo.

A continuación, se muestra una imagen a la que se le ha aplicado este índice.

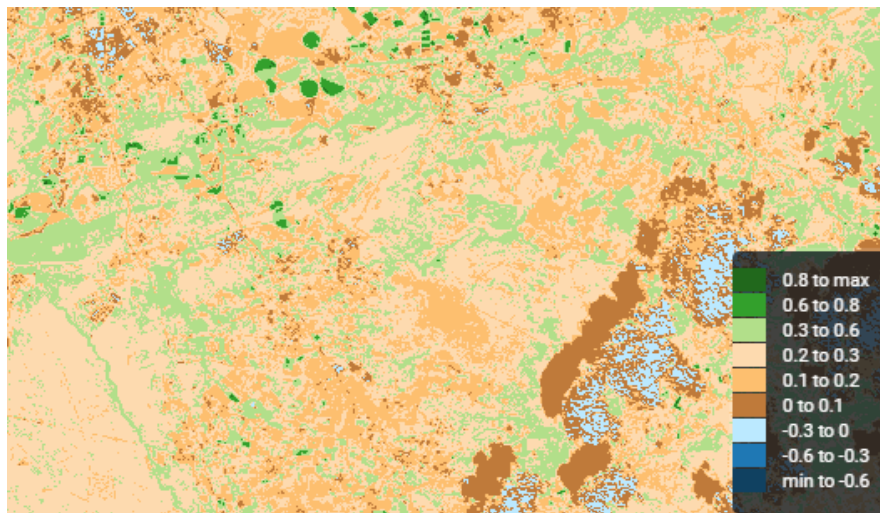


Figura 3.18: Índice de vegetación SAVI [47].

- WDRVI (*Weighted Difference Vegetation Index*)

Índice de vegetación que se utiliza para evaluar la salud y la densidad de la vegetación en una determinada área. Este índice es una variante del NDVI que incorpora pesos adicionales para las bandas del infrarrojo cercano y del rojo.

WDRVI es un índice diseñado para mejorar la sensibilidad en la detección de variaciones en la cobertura vegetal, especialmente en áreas con vegetación densa donde el NDVI tiende a saturarse. La idea principal del WDRVI es moderar la contribución del infrarrojo cercano (NIR) mediante un coeficiente de ponderación, de forma que pequeñas diferencias en zonas muy vegetadas puedan detectarse con mayor precisión.

El índice funciona reduciendo el peso del NIR, que en vegetación sana suele presentar valores muy altos y manteniendo la banda del rojo (RED) sin ponderar. Esto permite ampliar la sensibilidad del índice tanto en coberturas altas como bajas.

$$WDRVI = \frac{\alpha \times NIR - b \times RED}{\alpha \times NIR + b \times RED} \quad (3.9)$$

α es un coeficiente de ponderación entre 0 y 1, típicamente 0.1 o 0.2, elegido para reducir la influencia del NIR y evitar la saturación del NDVI. Al aplicar esta ponderación, el WDRVI mejora la respuesta en áreas con suelos desnudos, sombras o vegetación muy densa, proporcionando valores más estables y representativos que aquellos obtenidos mediante otros índices clásicos.

- YNDVI (*Yellow Normalized Difference Vegetation Index*)

Se trata de un índice de vegetación similar al NDVI pero que utiliza la banda amarilla en lugar de la banda roja.

- ARVI (*Atmospherically Resistant Vegetation Index*)

Se trata del primer índice de vegetación relativamente insensible a los factores atmosféricos (por ejemplo, aerosoles). Se corrige el NDVI para mitigar los efectos de la dispersión atmosférica duplicando las mediciones del espectro rojo y añadiendo longitudes de onda azules. Es decir, emplea la reflectancia en la banda azul para corregir la reflectancia roja por la dispersión atmosférica.

Es conveniente utilizarlo en regiones con alto contenido de aerosol atmosférico (por ejemplo, lluvia, niebla, polvo, humo, contaminación atmosférica)

$$ARVI = \frac{NIR - (2 * RED) + BLUE}{NIR + (2 * RED) + BLUE} \quad (3.10)$$

Sus valores varían entre -1 y 1 con valores más altos indicando una vegetación más saludable. A continuación, se muestra una imagen a la que se le ha aplicado este índice.

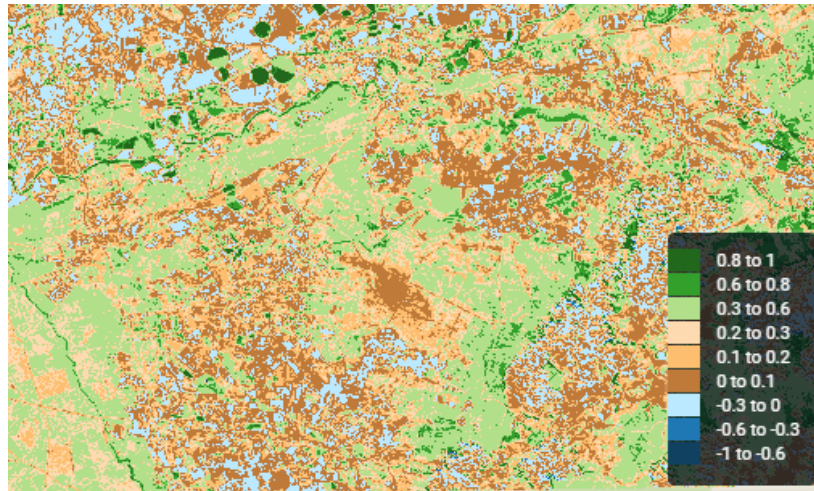


Figura 3.19: Índice de vegetación ARVI [47].

3.2.2 Banda Estrecha

A continuación, en esta sección aparecen índices de vegetación basados en bandas estrechas, los cuales emplean longitudes de onda muy específicas dentro del espectro electromagnético. A diferencia de los índices de banda ancha, que utilizan intervalos espectrales amplios como las bandas RED o NIR, los índices de banda estrecha se fundamentan en reflectancias medidas en rangos muy reducidos, normalmente expresados como ρ_λ (por ejemplo, ρ_{710} , ρ_{850}). Esta mayor precisión espectral permite detectar variaciones sutiles en la vegetación, como cambios en pigmentos, contenido de clorofila o estrés fisiológico, que no pueden observarse con bandas amplias debido a la mezcla de señales dentro de un intervalo demasiado extenso [48].

- MCARI (*Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index*)

Este índice recoge las variaciones del contenido de clorofila en las plantas. es especialmente útil cuando hay altos niveles de reflectancia de fondo en el suelo y otros objetos en las imágenes de satélite. Para conseguir la máxima precisión en el análisis remoto de la salud de las plantas, el MCARI debe utilizarse junto con el NDVI.

Se calcula de la siguiente manera:

$$MCARI = \frac{(\rho_{850} - \rho_{710}) - 0.2 \times (\rho_{850} - \rho_{570})}{\rho_{710}} \quad (3.11)$$

donde:

- ρ_{850} : Reflectancia en la banda espectral de 850 nanómetros.
- ρ_{710} : Reflectancia en la banda espectral de 710 nanómetros.

- ρ_{570} : Reflectancia en la banda espectral de 570 nanómetros.

- **MTVI** (*Modified Triangular Vegetation Index*)

Índice de vegetación que se utiliza para evaluar la salud de la vegetación y es sensible tanto al contenido de clorofila como a los carotenoides. Fue desarrollado como una mejora del TVI (*Triangular Vegetation Index*) para abordar algunas limitaciones y mejorar la sensibilidad a variaciones en la cantidad de pigmentos fotosintéticos en las plantas. La palabra "triangular" en estos índices hace referencia a la forma de la función utilizada en su cálculo.

Es útil para evaluar el estado de la vegetación en áreas con diferente cantidad de clorofila y carotenoides. La sensibilidad a estos pigmentos fotosintéticos hace que el MTVI sea un indicador valioso de la salud de la vegetación.

Se calcula de la siguiente manera:

$$MTVI = 1.5 \times \left(\frac{(2.5(\rho_{800} - \rho_{550}) - 1.3(\rho_{800} - \rho_{670}))}{\sqrt{((2\rho_{800} + 1)^2 - (6\rho_{800} - 5\rho_{670} - 0.5)^2 + 0.5) \times (0.6\rho_{800} - \rho_{550})}} \right) \quad (3.12)$$

donde:

- ρ_x : Reflectancia en la banda espectral de x nanómetros.

- **RENDVI** (*Red Edge Normalized Difference Vegetation Index*)

Modificación del NDVI que lo hace más útil para detectar la pérdida de vitalidad en la vegetación, ya que emplea bandas cercanas al borde de la banda roja en lugar de las bandas donde se encuentran las zonas de mayor absorción y reflectancia.

$$RENDVI = \frac{\rho_{750} - \rho_{705}}{\rho_{750} + \rho_{705}} \quad (3.13)$$

Varía de -1 a 1 con un rango normal para la vegetación de 0,2 a 0,9.

- **REPI** (*Red Edge Position Index*)

Índice que se utiliza para evaluar la posición del borde rojo en el espectro electromagnético. El borde rojo se refiere a la transición entre la región visible y la región del infrarrojo cercano en el espectro de la luz. La posición de este borde puede proporcionar información valiosa sobre la composición y salud de la vegetación.

La fórmula del REPI no está estandarizada y puede variar según el contexto y el propósito específico de su uso. Sin embargo, en términos generales, el REPI evalúa la relación entre las reflectancias en longitudes de onda específicas cerca del borde rojo del espectro. Una posición del borde rojo desplazada puede indicar cambios en la composición bioquímica de la vegetación, como variaciones en el contenido de clorofila o la presencia de pigmentos relacionados.

Por ejemplo, para un caso específico (Planet), se podría evaluar de la siguiente forma:

$$REPI = \frac{RED\ EDGE - RED}{RED\ EDGE + RED} \quad (3.14)$$

- TCARI (*Transformed Chlorophyll Absorption in Reflectance Index*)

Mide la profundidad de absorción de la clorofila en el rojo con relación a los máximos picos de reflectancia en verde y borde rojo, es muy sensible a la reflectividad del suelo, motivo por el cual es complejo de interpretar en aquellos casos donde el índice de área foliar tiene valores bajos.

La fórmula del TCARI implica la transformación de las bandas espectrales para enfatizar la absorción de clorofila:

$$TCARI = \left(\frac{\rho_{red} - \rho_{700}}{\rho_{red} + \rho_{700}} \right) * \left(\frac{\rho_{red}}{\rho_{700}} \right) \quad (3.15)$$

Capítulo 4: Sistemas y Entornos de Procesamiento de Datos para Teledetección.

El Capítulo 4 describe el conjunto de herramientas empleadas para el desarrollo del TFG, así como la metodología general seguida. Se detallan los entornos de trabajo utilizados, como Python y Google Colab, junto con librerías clave para el análisis geoespacial. Además, se explica cómo se organizó el flujo de trabajo para garantizar eficiencia y reproducibilidad.

4.1 Uso del lenguaje de programación Python en teledetección.

Como se ha visto en anteriores capítulos de esta memoria, en la actualidad, el procesamiento de imágenes multispectrales se ha convertido en una herramienta fundamental en numerosos campos como la agricultura de precisión, la gestión ambiental y territorial o la monitorización de recursos naturales, como es nuestro caso. Este tipo de imágenes, captadas por sensores remotos ubicados en satélites o drones, requieren una serie de transformaciones y análisis para poder extraer información útil. Aunque existen múltiples programas especializados en este tipo de tareas, los lenguajes de programación se han establecido como una alternativa eficiente y versátil para abordar estas operaciones con mayor control y optimización [49].

El uso de entornos de programación, como Python, permite automatizar flujos de trabajo complejos, desarrollar soluciones personalizadas y gestionar grandes volúmenes de datos de forma eficiente. Sus diferentes librerías de código abierto, sumado a una comunidad colaborativa, lo convierte en un recurso especialmente valioso en proyectos de teledetección y análisis geoespacial.

Entre los lenguajes más utilizados para el tratamiento de imágenes multispectrales destaca Python, debido a su sintaxis sencilla, su gran comunidad de usuarios y la existencia de numerosas librerías especializadas en datos geoespaciales. Python ha resultado ser especialmente eficaz para tareas como la lectura y manipulación de imágenes satelitales, el análisis espectral, la gestión de archivos ráster y vectoriales, así como la automatización de procesos complejos. Todo ello lo convierte en una buena opción para el desarrollo de proyectos en teledetección y análisis geoespacial.

4.2 Aplicaciones de Python en el análisis fenológico del Parque Nacional de La Caldera de Taburiente.

En este trabajo, Python ha sido el entorno central para aplicar el análisis fenológico a partir de datos multitemporales. Gracias a su capacidad para integrar múltiples tareas dentro de un mismo flujo de trabajo, ha sido posible extraer información precisa sobre la evolución estacional de la vegetación.

Una de las principales ventajas de usar Python es su capacidad para integrar distintas operaciones dentro de un mismo flujo de trabajo. Por ejemplo, con unos pocos scripts es posible generar mosaicos a partir de imágenes individuales, recortarlos utilizando shapefiles que delimitan zonas de interés y calcular automáticamente una gran variedad

de índices de vegetación. Esto no solo permite ahorrar tiempo, sino que también reduce bastante el riesgo de errores humanos y mejora la capacidad para ser repetido un mismo análisis, lo que es especialmente interesante en estudios a largo plazo o en proyectos con múltiples áreas de análisis.

Gracias a esta integración de mecanismos, ha sido posible aplicar de manera sistemática y precisa el análisis fenológico de la vegetación en el Parque Nacional de La Caldera de Taburiente. La automatización del procesamiento multitemporal ha permitido observar los cambios estacionales y estructurales en la vegetación, cumpliendo así con el objetivo principal de este trabajo.

4.3 Integración de Python con QGIS para la visualización y el análisis.

Aunque Python permite una automatización eficaz, su uso se ha complementado con QGIS. Este soporte es un Sistema de Información Geográfica (SIG) de código abierto muy utilizada en el ámbito académico y profesional por su capacidad para visualizar, editar, analizar y gestionar datos espaciales. Su interfaz intuitiva y su compatibilidad con múltiples formatos de archivo la convierten en una herramienta bastante versátil, muy útil en proyectos que requieren análisis geoespaciales rápidos y visualmente interpretables.

En el contexto del procesamiento de imágenes multiespectrales, QGIS también permite realizar operaciones como el recorte de imágenes según zonas de interés, la combinación de diferentes capas de información geoespacial, la revisión detallada de la información asociada a los datos o la creación de mapas para interpretar resultados. Aunque en este trabajo se ha dado prioridad al uso de Python para tareas automatizadas y repetitivas, QGIS sigue siendo una muy buena plataforma, particularmente en la fase de comprobación visual, generación de mapas y revisión de los productos obtenidos.

En este trabajo, Python ha sido la plataforma principal para las operaciones repetitivas de procesado, mientras que QGIS se ha utilizado para la validación visual de los resultados, la elaboración de mapas y la inspección detallada de los productos. Esta combinación aprovecha lo mejor de cada herramienta.

4.4 Entorno: Google Colab y Google Drive.

El uso del lenguaje de programación Python ha sido esencial en este proyecto para automatizar y optimizar las tareas de procesamiento de imágenes multiespectrales del

Parque Nacional de La Caldera de Taburiente. Para ello, se ha trabajado en el entorno Google Colab, una plataforma basada en la nube que permite ejecutar código Python directamente desde el navegador, sin necesidad de realizar configuraciones locales.

Google Colab ha resultado especialmente útil para el manejo eficiente de grandes volúmenes de datos, permitiendo ejecutar análisis multiespectrales sin sobrecargar recursos locales. Su integración con Google Drive ha facilitado la organización estructurada de datos y el acceso remoto a los archivos necesarios durante todas las etapas del trabajo.

El uso de Google Drive no solo ha facilitado el acceso remoto a los datos desde cualquier dispositivo, sino que también ha contribuido a mantener una estructura clara y ordenada de carpetas y archivos. A través de scripts en Python, se han definido rutas dinámicas y nombres de archivo de forma programada, lo que ha permitido cargar los datos automáticamente en cada etapa del trabajo, minimizando la necesidad de intervención manual.

Además, Google Colab ofrece un entorno colaborativo que facilita la compartición de cuadernos de trabajo con otros usuarios. Esta característica resulta especialmente valiosa desde el punto de vista académico, ya que permite la revisión, validación o reproducción del análisis por parte de terceros.

El código desarrollado ha permitido automatizar varias tareas clave en el análisis de imágenes satelitales, tales como el recorte de áreas de interés mediante archivos vectoriales (shapefiles), la lectura y manipulación de bandas espectrales y el cálculo de índices de vegetación fundamentales para el análisis fenológico. Todo este flujo ha sido gestionado a través de scripts diseñados específicamente para este proyecto, los cuales permiten ejecutar de forma secuencial y repetible cada etapa del procesamiento, garantizando así la eficiencia y la reproducibilidad del análisis.

Un script, en este contexto, es un archivo de código que contiene una serie de instrucciones escritas en Python, organizadas para ser ejecutadas automáticamente en orden. Esta automatización ha sido crucial para abordar el análisis de grandes cantidades de datos de forma estructurada, especialmente en un estudio multitemporal como es este [50].

Como se ha expuesto a lo largo del capítulo, el entorno de procesamiento se ha desarrollado sobre una base de librerías especializadas en el manejo de datos geoespaciales, lectura de archivos ráster y manipulación de estructuras numéricas. Esto ha permitido abordar las diversas etapas del análisis de imágenes multiespectrales de la constelación PlanetScope, automatizando tareas repetitivas y garantizando el control sobre el flujo de trabajo.

Entre las librerías empleadas, destacan:

- GDAL (*Geospatial Data Abstraction Library*), parte del conjunto OSGeo, esencial para la lectura, escritura y transformación de archivos ráster.
- NumPy, utilizada para la manipulación de arrays numéricos y el tratamiento matemático de las bandas espectrales.
- glob y json, útiles para la gestión dinámica de archivos y la lectura de metadatos satelitales.
- subprocess, que permite la ejecución de comandos externos desde Python, lo cual ha sido fundamental para la integración de bibliotecas como gdal_merge.py, útil, por ejemplo, si se quisiera para la generación automática de mosaicos [51].

Asimismo, para la verificación visual y la vista previa de los datos procesados, se ha hecho uso de matplotlib.pyplot, una biblioteca eficaz para generar gráficos y composiciones RGB. Estas visualizaciones han resultado de gran ayuda para evaluar comprobaciones intermedias antes de proceder con análisis más avanzados [52].

La combinación de todas estas herramientas ha hecho posible el desarrollo de un entorno de trabajo orientado específicamente al análisis fenológico de la vegetación. Este enfoque ha permitido una mayor eficiencia y precisión.

Finalmente, cabe señalar que, si bien este capítulo ha descrito de forma general el entorno de trabajo y sus principales herramientas, los próximos apartados abordarán con mayor detalle los scripts implementados y su aplicación práctica. Se mostrará cómo se ha realizado cada una de las fases del análisis, desde la preparación de las imágenes hasta el estudio temporal por parcelas de interés dentro del Parque Nacional de La Caldera de Taburiente.

4.5 Metodología general del flujo de trabajo.

El flujo de trabajo diseñado para este proyecto establece una secuencia lógica de operaciones orientadas al análisis multitemporal de imágenes multispectrales del Parque Nacional de La Caldera de Taburiente. Esta estructura ha sido diseñada con un enfoque modular y automatizado, facilitando tanto la eficiencia como la capacidad de reproducción de los resultados obtenidos.

El proceso comienza con una fase de organización y preparación de datos, que incluye la organización de carpetas en Google Drive. Este paso garantiza que los scripts desarrollados en Python puedan localizar y procesar los archivos sin requerir intervención manual constante. Las imágenes satelitales, shapefiles, metadatos en JSON y demás recursos se agrupan por fechas, lo que permite un acceso ordenado.

A continuación, mediante la integración de Google Drive en Google Colab, se ejecuta el entorno de trabajo, lo que da acceso remoto y directo a los datos desde el cuaderno de ejecución.

Las siguientes etapas incluyen la lectura automatizada de metadatos, y el recorte espacial según el área de estudio. También se generan composiciones RGB para una verificación visual intermedia.

Posteriormente, se lleva a cabo el procesamiento de bandas espectrales mediante operaciones matriciales con NumPy, lo que permite la creación automatizada de índices de vegetación. Esta información constituye la base del análisis fenológico del Parque Nacional.

Tras el cálculo de los índices de vegetación, se extraen estadísticas dentro de cada parcela definida en un shapefile para ser normalizadas. Esto permite generar series temporales por unidad de estudio, fundamentales para evaluar los cambios fenológicos de la vegetación a lo largo del tiempo.

Todo este proceso ha sido desarrollado mediante scripts en Python que permiten su ejecución secuencial, estructurada y automatizada, contribuyendo a una gestión eficiente del flujo de trabajo. Esta organización también permite modificar o extender partes del proceso sin afectar al resto, lo que resulta especialmente útil durante periodos de validación o ajustes, como es nuestro caso.

El análisis se aplicó sobre un conjunto 16 fechas correspondientes a los años 2021 a 2024, permitiendo observar el comportamiento fenológico en cuatro formaciones vegetales principales del parque. Para ello, se procesaron decenas de escenas multiespectrales mediante flujos automatizados, asegurando consistencia en el tratamiento y comparabilidad entre fechas.

Dado que cada uno de estos componentes se analizará con mayor detalle en los capítulos posteriores, este apartado tiene como finalidad ofrecer una visión general del conjunto de las tareas implicadas. Para ilustrar gráficamente todo lo que se acaba de desarrollar, a continuación, se adjunta un diagrama de flujo que sintetiza visualmente los pasos principales del proceso.

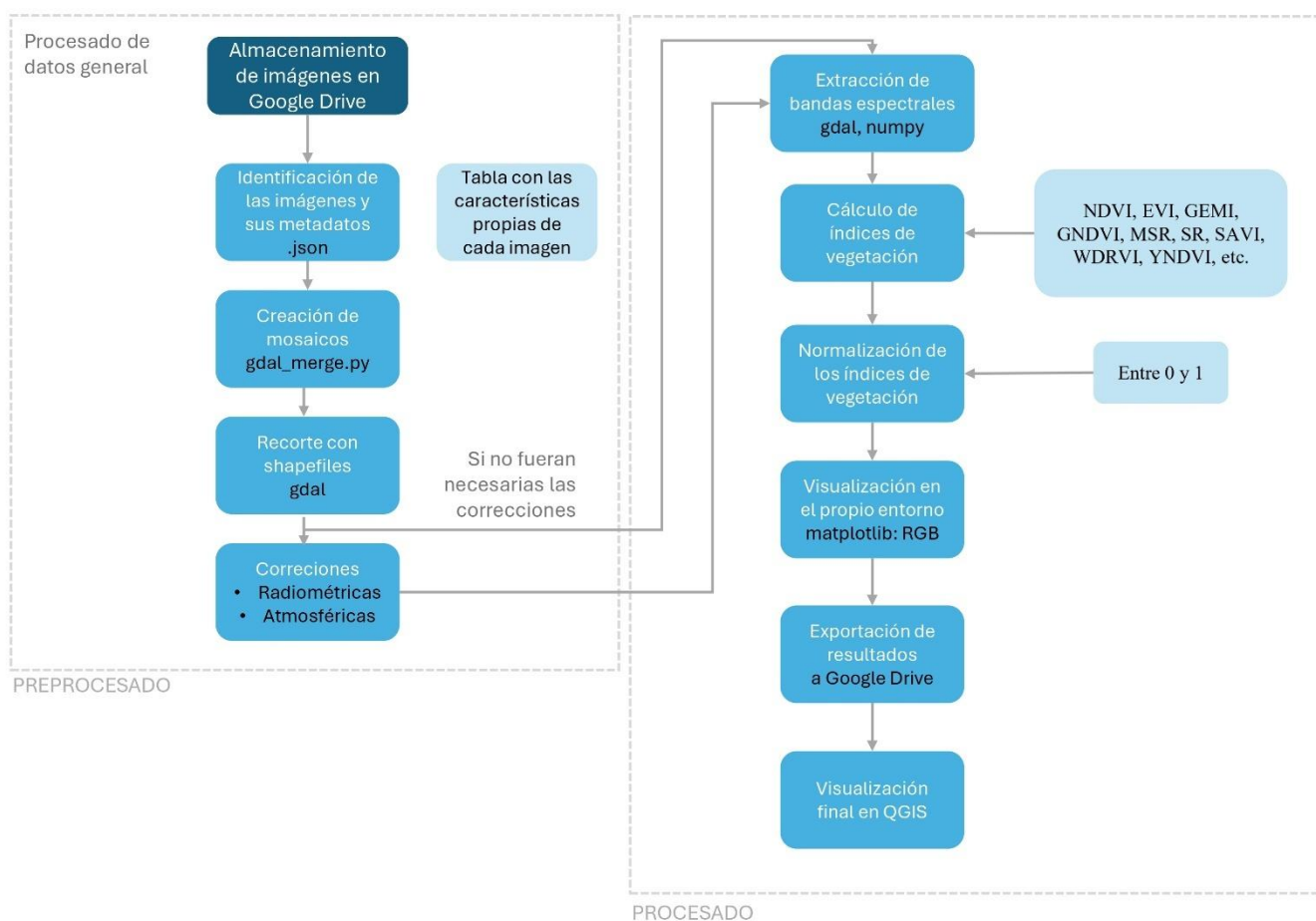


Figura 4.1. Flujo de trabajo general del preprocesado y análisis multitemporal de imágenes satelitales, indicando las herramientas y etapas empleadas en el desarrollo del TFG. Elaboración propia.

Capítulo 5: Preprocesamiento y Preparación de Imágenes Satelitales para el Análisis Fenológico.

El Capítulo 5 describe las etapas necesarias para preparar las imágenes satelitales antes del análisis fenológico. Incluye la selección, proceso de generación de mosaicos, recortes espaciales, y corrección de nubes y sombras. Este preprocesado garantiza la calidad y coherencia temporal de los datos utilizados.

5.1 Evaluación inicial de imágenes y criterios de selección

El objetivo del presente estudio es analizar la evolución estacional y anual de la vegetación en el Parque Nacional de la Caldera de Taburiente entre los años 2021 y 2024. Para ello, se seleccionó una imagen representativa por estación y año, dando lugar a un conjunto de 16 fechas.

Dado que las imágenes multiespectrales pueden verse afectadas por diversos factores atmosféricos como nubes, sombras o calima, el primer paso del preprocesado consistió en una revisión visual detallada de todas las imágenes disponibles para cada periodo. Este análisis tuvo como objetivo descartar aquellas capturas con distorsiones evidentes y priorizar las de mejor calidad radiométrica, nitidez y cobertura.

Este filtrado inicial reduce la carga del conjunto del análisis posterior, mejora la fiabilidad de los índices de vegetación calculados y garantiza una mejor representación del estado de la vegetación en cada estación del año.

5.1.1 Revisión visual de imágenes en QGIS

Se realizó una inspección visual de las imágenes disponibles utilizando QGIS. Las imágenes PlanetScope fueron organizadas por año y cargadas individualmente. Se representaron en RGB mediante la asignación de las bandas espectrales adecuadas (Rojo, Verde, Azul), ajustando brillo, contraste, gamma y valores mínimos/máximos para una visualización coherente.

Este proceso permitió evaluar la presencia de nubes, sombras, reflejos o calima. Cada imagen fue evaluada de forma independiente y clasificada según su nitidez general y presencia de fenómenos, quedando documentado en una tabla de datos de selección.

Para ilustrar el proceso de selección de imágenes, a continuación, se encuentra dos ejemplos representativos:

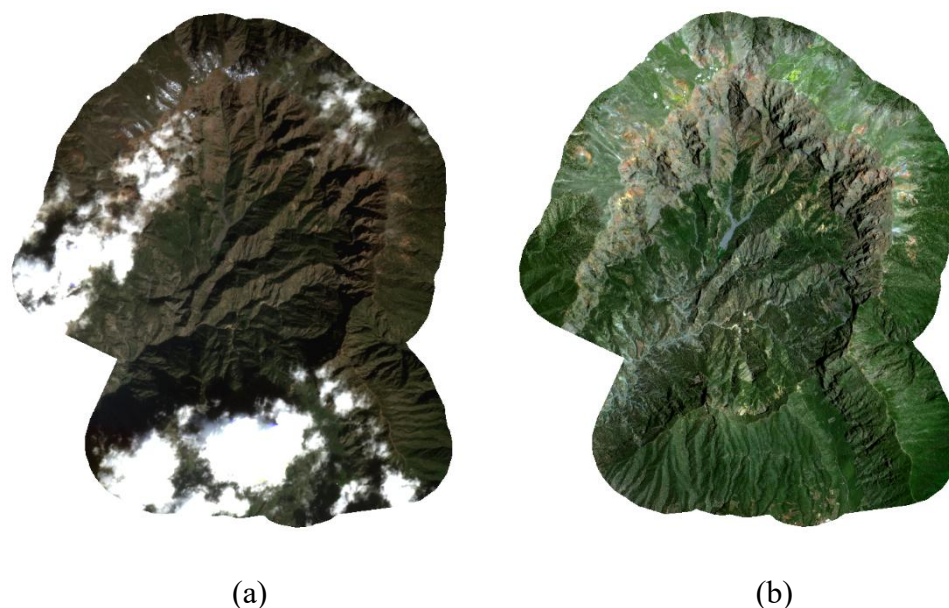


Figura 5.1. (a) Imagen descartada debido a la presencia de nubes, las cuales dificultan la interpretación de la vegetación. (b) Imagen seleccionada como válida, libre de nubes y adecuada para el análisis fenológico. Elaboración Propia.

Estas figuras permiten visualizar de manera clara los criterios empleados para clasificar y seleccionar las escenas, reforzando la documentación incluida en la tabla de datos de selección.

5.1.2 Clasificación cualitativa y elaboración de tabla de imágenes

Se elaboró una tabla de clasificación que recoge información clave como fecha de adquisición, porcentaje estimado de nubosidad, nitidez (escala 1-5) y observaciones. Esta herramienta fue fundamental para seleccionar las imágenes más adecuadas para el análisis fenológico posterior.

Se descartaron las imágenes con presencia significativa de elementos que pudieran afectar a la precisión y fiabilidad de los índices y se priorizaron aquellas con mejores condiciones atmosféricas y calidad radiométrica.

A continuación, se muestra un fragmento de la tabla de clasificación visual de imágenes, en el que se anotan aspectos como la nubosidad, la orientación de las nubes, la nitidez general y observaciones cualitativas relevantes. Esta información permitió tomar

decisiones fundamentadas sobre la selección final de escenas por estación. La tabla completa con todas las fechas analizadas se incluye en el Anexo I.

Tabla 5.1. Fragmento. Evaluación visual de imágenes satelitales para los años 2020–2021.

Fecha	Nubosidad	Orientación de las Nubes	Calidad General [1-5]	Observaciones
2021				
18/02/2021	-	-	4	Nieve en el N
19/02/2021	-	-	4	Nieve en el N
24/02/2021	Muy baja	SO, SE	4	
28/02/2021	Media alta	O – NO, S	2	
16/03/2021	-	-	3	Destellos en el N (posible bruma)
17/03/2021	-	-	3	Destellos en el N (posible bruma)
19/03/2021	Alta	SE	4	Pequeñas nubes

Se puede ver la tabla al completo en el ANEXO I.

5.1.3. Selección final de imágenes por estación y año

Una vez completado el análisis visual de todas las imágenes disponibles y documentada su calidad en la *Tabla 5.1*, se procedió a la selección definitiva de las imágenes que serían utilizadas en las siguientes fases del proyecto. Esta selección resulta clave, ya que define el conjunto de imágenes que permitirán representar la evolución estacional de la vegetación en el Parque Nacional de La Caldera de Taburiente durante el periodo 2021–2024. El año 2020 fue descartado del análisis debido a la baja calidad general de las imágenes disponibles, ya que la presencia de sombras, mosaicos mal ensamblados y otros defectos podría comprometer la fiabilidad de los resultados fenológicos.

Para ello, se adoptó un enfoque basado en las estaciones del año (invierno, primavera, verano y otoño), seleccionando una imagen representativa por cada estación y año, siempre que las condiciones atmosféricas y de calidad lo permitieran. Este criterio se basa en la necesidad de capturar los momentos clave del ciclo fenológico de la vegetación, considerando las variaciones estacionales en temperatura, radiación, presencia de agua y actividad fotosintética. Por ejemplo, la primavera suele estar asociada a un pico de crecimiento y verdor, mientras que el verano puede reflejar

estados de estrés hídrico, especialmente en ecosistemas insulares con marcada estacionalidad.

Dentro de cada estación se compararon todas las imágenes disponibles y se seleccionó la que presentara mejor calidad y menor afectación por nubes, calima o sombras. En la mayoría de los casos se optó por imágenes con una puntuación visual de calidad de 4 o 5. Cuando existían varias opciones de calidad similar, se priorizó aquella cuya fecha estuviera más equilibradamente distribuida dentro del año, con el fin de obtener una secuencia temporal homogénea y representativa de los patrones estacionales.

El resultado de esta selección es un conjunto de 16 imágenes, que abarcan de invierno de 2021 a verano de 2024, incluyendo una imagen por estación (excepto en otoño de 2024, donde no se disponía de datos adecuados en el momento del cierre del estudio). Esta distribución garantiza una cobertura temporal adecuada para el análisis fenológico, permitiendo observar tendencias tanto entre estaciones como interanuales.

A continuación, aparece la tabla resumen con las fechas seleccionadas:

Tabla 5.2. Selección final de imágenes por estación y año tras evaluación visual.

Año	Invierno	Primavera	Verano	Otoño
2021	24/02/2021	19/03/2021	28/06/2021	11/09/2021
2022	11/01/2022	09/04/2022	17/06/2022	18/10/2022
2023	07/01/2023	24/03/2023	29/06/2023	27/09/2023
2024	07/01/2024	16/03/2024	15/06/2024	26/08/2024

La distribución visual de las imágenes seleccionadas se muestra a continuación, complementando la tabla previa y permitiendo observar el conjunto final de datos.



Figura 5.2. Conjunto de las 16 imágenes multiespectrales seleccionadas por estación y año (2021–2024) para el análisis fenológico. Elaboración propia.

Se observa que algunas imágenes presentan tonalidades más azuladas o marrones en comparación con otras. Estas variaciones se deben principalmente a diferencias en las condiciones de iluminación, ángulo solar, presencia de sombras y la propia captura de las imágenes satelitales que no reflejan cambios reales en la vegetación. Por tanto, cualquier interpretación fenológica debe centrarse en el análisis multitemporal y no en la percepción visual de las imágenes.

En determinados casos, especialmente cuando la disponibilidad de imágenes era limitada para una estación concreta, se priorizó mantener una distribución temporal representativa del ciclo fenológico anual, incluso si ello implicaba seleccionar imágenes con una calidad visual ligeramente inferior.

Cabe señalar que, aunque se procuró seleccionar una imagen representativa para cada estación del año, en algunos casos puntuales no fue posible disponer de capturas adecuadas dentro del rango temporal exacto que marca cada estación. Esto se debió a la escasa disponibilidad de imágenes de calidad en ciertos periodos, principalmente por la presencia de nubes, sombras o condiciones atmosféricas adversas. Por ello, algunas fechas seleccionadas no coinciden exactamente con los límites astronómicos de la estación correspondiente, pero sí se sitúan en un rango temporal muy próximo, manteniendo así la coherencia estacional del análisis fenológico.

Este conjunto de imágenes constituye la base sobre la cual se llevarán a cabo los cálculos de índices de vegetación y el posterior análisis multitemporal de las formaciones vegetales presentes en el parque.

5.2 Generación de mosaicos satelitales

5.2.1 Composición de imágenes

En el ámbito del análisis multitemporal de imágenes satelitales, es habitual que una misma escena del territorio esté compuesta por varias capturas contiguas, especialmente cuando se trabaja con coberturas de alta resolución espacial. Esta situación obliga, en muchos casos, a realizar una etapa previa de fusión de imágenes, unificando diferentes fragmentos ráster en una sola imagen. Esta técnica, conocida como generación de mosaicos, resulta fundamental cuando la zona de interés no está completamente cubierta por una sola escena.

En el caso de este Trabajo de Fin de Grado, no ha sido necesario llevar a cabo la creación de mosaicos, ya que las imágenes seleccionadas para el análisis fenológico del Parque Nacional de La Caldera de Taburiente cubrían de forma completa y continua el área de estudio. Las imágenes proporcionadas por la plataforma PlanetScope ya venían preprocesadas y recortadas con una extensión suficiente para incluir tanto las parcelas representativas de los diferentes tipos de vegetación como una zona afectada por un incendio.

No obstante, por su relevancia en estudios de teledetección, se describe brevemente a continuación el proceso estándar de generación de mosaicos, tal como se habría implementado en caso de haber sido necesario.

5.2.2 Automatización del proceso mediante Python y GDAL

A continuación, se describe brevemente el procedimiento estándar de generación de mosaicos, como referencia metodológica para posibles estudios futuros.

El procedimiento, diseñado para ejecutarse en el entorno Google Colab y trabajar con imágenes almacenadas en Google Drive, puede resumirse en los siguientes pasos:

1. **Montaje de Google Drive y carga de librerías:** Se conecta el entorno Colab con el sistema de archivos de Google Drive, e importa librerías como `gdal`, `subprocess` y `glob`.
2. **Localización de carpetas con imágenes a fusionar:** El script explora automáticamente las subcarpetas que contienen los fragmentos individuales que componen una escena incompleta.
3. **Filtrado de archivos relevantes:** Se identifican los archivos `.tif` que cumplen un patrón específico (por ejemplo, `*_clip.tif`), excluyendo imágenes auxiliares o metadatos.
4. **Ejecución del mosaico:** Con los fragmentos correctamente localizados, `gdal_merge.py` fusiona los archivos en una única imagen, que se guarda con un nombre identificativo (por ejemplo, `mosaico_final.tif`).

Este flujo de trabajo garantiza eficiencia y reproducibilidad, permitiendo procesar múltiples imágenes de forma estandarizada y con mínimo riesgo de errores manuales.

A continuación, se muestran tres imágenes que representan visualmente el proceso.

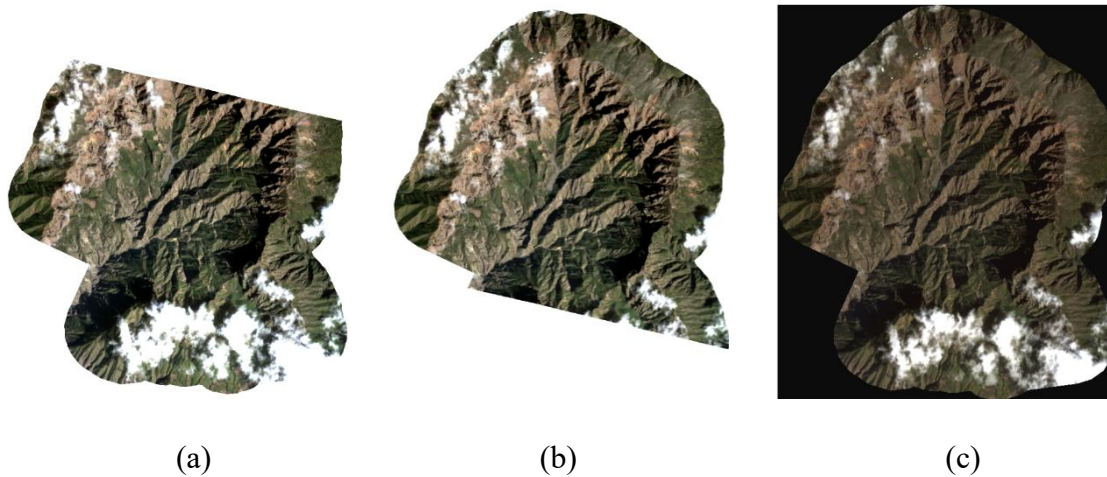


Figura 5.3. Generación del Mosaico: (a) Imagen correspondiente a la parte sur de la escena. (b) Imagen correspondiente a la parte norte de la misma fecha. (c) Imagen continua obtenida tras la unión de ambos fragmentos. Elaboración Propia.

5.3 Recorte espacial al área de estudio

5.3.1 Delimitación espacial: Parque Nacional, parcelas de vegetación y zona del incendio

En estudios basados en teledetección multitemporal, el recorte espacial constituye un paso esencial para centrar los análisis en áreas geográficas de interés, eliminando información irrelevante y reduciendo el volumen de datos a procesar. En este Trabajo de Fin de Grado, se aplicaron dos niveles de recorte espacial: primero a todo el Parque Nacional de La Caldera de Taburiente, y posteriormente a zonas específicas dentro de él, como parcelas representativas de diferentes tipos de vegetación y una zona afectada por incendio.

Aunque las imágenes proporcionadas por la plataforma PlanetScope ya estaban previamente recortadas siguiendo los límites del parque nacional, fue necesario incorporar un segundo nivel de recorte más preciso para realizar análisis más localizados. En primer lugar, los índices de vegetación fueron calculados sobre el conjunto del parque, aplicando previamente la corrección atmosférica mediante máscaras de nubes y sombras (profundizaremos sobre ello más adelante). Una vez generados estos índices multitemporales, las imágenes resultantes fueron recortadas para extraer los valores correspondientes a seis zonas de interés definidas por shapefiles: La Caldera de Taburiente al completo, cuatro parcelas de vegetación representativas y una zona afectada por incendio.

La delimitación de las parcelas de vegetación se realizó a partir de una capa vectorial de uso público descargada de la Infraestructura de Datos Espaciales de Canarias (IDECanarias / GRAFCAN) [53], que clasifica la isla de La Palma en unidades según su vegetación. A partir de esta cartografía, se seleccionaron las cuatro formaciones vegetales más extensas y representativas dentro del Parque Nacional:

- **Caldera de Taburiente** (recorte_caldera.shp): zona del fondo del parque, de carácter mixto, con presencia de vegetación riparia, herbácea y áreas abiertas.
- **Pinar con cedros** (pinar_con_cedros.shp): formación mixta de *Pinus canariensis* y presencia puntual de *Juniperus cedrus*, característica de zonas frescas y con menor exposición solar.
- **Pinar con codesos de cumbre** (pinar_con_codesos_de_cumbre.shp): formación típica de cumbres, dominada por pino canario y matorral alto como *Adenocarpus foliolosus* y *Chamaecytisus proliferus*.
- **Pinar palmero** (pinar_palmero.shp): bosque maduro de pino canario sobre laderas bien conservadas, con cobertura vegetal densa.
- **Retamonar-codesar** (retamonar_codesar.shp): matorral de alta montaña dominado por *Spartocytisus supranubius* y *Adenocarpus viscosus*, característico de zonas expuestas y de gran altitud [54].

Estas parcelas fueron extraídas de la capa original mediante operaciones en QGIS y exportadas como shapefiles independientes. Cada una de ellas delimita un área sobre la que se realizó el análisis fenológico, lo que permitió estudiar la evolución temporal de cada tipo de formación vegetal.

Adicionalmente, se incorporó una sexta parcela correspondiente a una la zona afectada por el incendio registrado en el interior del parque. Esta área fue digitalizada manualmente en QGIS, a partir de la observación de imágenes satelitales posteriores al evento. Mediante la herramienta de polígono se dibujó a mano alzada un shapefile que abarca la superficie visiblemente alterada por el fuego. Si bien esta delimitación no es precisa al 100%, fue adecuada para realizar un seguimiento del proceso de degradación y recuperación de la vegetación tras el incendio.

A continuación, se presenta un mapa en el que se visualizan las distintas parcelas seleccionadas para el análisis fenológico dentro del Parque Nacional de la Caldera de

Taburiente. En él se representan las cinco áreas de estudio correspondientes a diferentes tipos de vegetación (pinar con cedros, pinar con codesos de cumbre, pinar palmero, retamonar-codesar y caldera de Taburiente), así como la zona delimitada manualmente como área afectada por el incendio. Esta representación permite apreciar la distribución espacial dentro del parque.

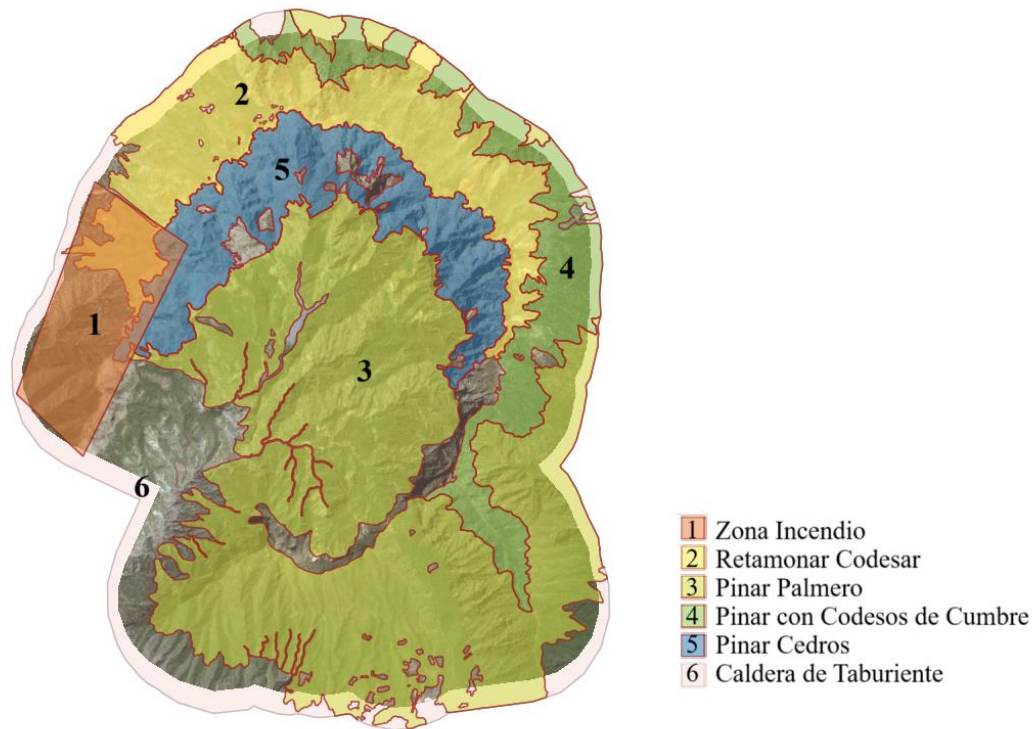


Figura 5.4. Mapa de las parcelas seleccionadas dentro del Parque Nacional de La Caldera de Taburiente, incluyendo los shapefiles de vegetación e incendio. Elaboración Propia.

5.4 Correcciones geométricas y radiométricas

En el tratamiento de imágenes satelitales, la corrección geométrica y radiométrica constituye una etapa clave para garantizar la calidad de los análisis posteriores, como se ha mencionado. Estos procedimientos permiten minimizar errores asociados a desplazamientos espaciales (geométricos) o a variaciones en la respuesta espectral de los sensores debidas a factores atmosféricos o de iluminación (radiométricos).

En este trabajo, no fue necesario aplicar correcciones geométricas adicionales, ya que las imágenes PlanetScope descargadas ya venían ortorreferenciadas, es decir, presentaban una adecuada alineación espacial. Esta alineación fue verificada mediante

la superposición de imágenes consecutivas y capas vectoriales de referencia en QGIS, sin detectarse desplazamientos apreciables entre fechas. Por tanto, la coincidencia espacial entre escenas se consideró precisa como para llevar a cabo el análisis multitemporal propuesto.

En cuanto a las correcciones radiométricas, se desarrolló un procedimiento automatizado de detección y eliminación de nubes y sombras, aplicado de forma individual sobre cada una de las 16 imágenes seleccionadas. Este proceso se ejecutó mediante un script en Python basado en las bibliotecas rasterio y NumPy, combinando el uso de la máscara UDM2 proporcionada por Planet (que indica píxeles válidos) con criterios adicionales de detección espectral.

Concretamente, se aplicaron los siguientes filtros:

- Eliminación de píxeles identificados como no válidos por la máscara UDM2 (valor 0).

La máscara UDM2 (Unusable Data Mask 2) proporcionada por Planet permite identificar píxeles que el proveedor considera no válidos, ya sea por nube, sombra, error de sensor, etc. Al eliminar automáticamente todos los píxeles marcados con valor 0 en esa máscara, se asegura que no se utilice en el análisis información demasiado contaminada.

Sin embargo, aunque la UDM2 es útil, varios estudios han demostrado que no siempre detecta todas las nubes o sombras: es decir, la máscara base no es suficiente por sí sola [55]. Por ello, hemos complementado la UDM2 con filtros espectrales adicionales.

- Identificación adicional de **sombras** mediante la detección de valores bajos en la banda del infrarrojo cercano ($B8 < 0.05$).

Las sombras en imágenes multiespectrales se manifiestan típicamente como regiones con muy baja reflectancia en el infrarrojo cercano (NIR). Esto se debe a que, en las zonas de sombra, la radiación directa del sol queda bloqueada, y solo queda iluminación difusa para esas superficies. Además, el NIR es una banda donde muchos tipos de vegetación tienen reflectancia muy alta cuando están iluminados, por lo que la caída de señal en NIR es más notable precisamente en las sombras.

Por eso, definir un umbral muy bajo en la banda B8 (NIR), por ejemplo, $B8 < 0.05$, permite capturar esos píxeles oscuros que muy probablemente corresponden a sombras (ya sean de nubes o topográficas). Al aplicar ese filtro adicional sobre la máscara UDM2, se mejora la discriminación de píxeles contaminados por sombra sin eliminar vegetación real iluminada [56].

- Detección de **nubes** por combinación de valores elevados simultáneos en las bandas azul ($B2 > 0.3$) e infrarrojo cercano ($B8 > 0.3$), que indican alta reflectancia típica de nubes densas.

Las nubes densas tienen una característica espectral: reflejan fuertemente en la banda azul porque las gotas de agua dispersan la luz de onda corta, y también pueden tener una reflectancia relativamente alta en el infrarrojo cercano (NIR), ya que parte de la radiación solar se refleja por la columna de nube. Por lo tanto, una combinación en la que se exigen valores altos en B2 (azul) y B8 (NIR) puede ser eficaz para identificar píxeles con probabilidad de nubes [57].

Cabe destacar que los umbrales aplicados en este estudio ($B8 < 0.05$ para sombras y $B2/B8 > 0.3$ para nubes) fueron seleccionados de manera empírica. No existe un valor determinado para la detección de nubes y sombras en imágenes PlanetScope, ya que la reflectancia observada depende de factores como el tipo de sensor, la iluminación solar, la época del año y las características del terreno. Por ello, se realizaron múltiples pruebas ajustando los valores de los umbrales y evaluando visualmente los resultados sobre las imágenes originales.

La decisión de aplicar este tipo de filtrado se justifica especialmente por las características geográficas de la isla de La Palma. Al tratarse de un territorio con un gran relieve montañoso, es común que en muchas imágenes satelitales aparezcan zonas afectadas por sombras, incluso en condiciones meteorológicas favorables. Estas sombras, junto con la presencia ocasional de nubes, generan distorsiones importantes en los valores espectrales registrados, lo que afecta negativamente al cálculo de los índices de vegetación. En concreto, los píxeles oscurecidos tienden a mostrar valores artificialmente bajos, simulando una cubierta vegetal menos activa o ausente, cuando en realidad se trata de un error de observación. Por esta razón, se optó por prescindir completamente de las zonas contaminadas por sombras y nubes, y limitar los análisis fenológicos exclusivamente a los píxeles considerados válidos. De este modo, se

garantiza que los cálculos reflejen únicamente la vegetación real en cada imagen, sin interferencias que puedan comprometer al análisis del ecosistema.

A continuación, se muestra un ejemplo del procedimiento aplicado para la corrección radiométrica y la detección de píxeles no válidos, correspondiente a la primera imagen temporal utilizada en el análisis: la capturada el 24 de febrero de 2021. En esta serie de imágenes se muestra de forma detallada el funcionamiento de la máscara de generada (blanco = píxeles válidos), así como las áreas afectadas por nubes (en rojo) y sombras (en azul), detectadas mediante el análisis espectral y las capas auxiliares UDM2.

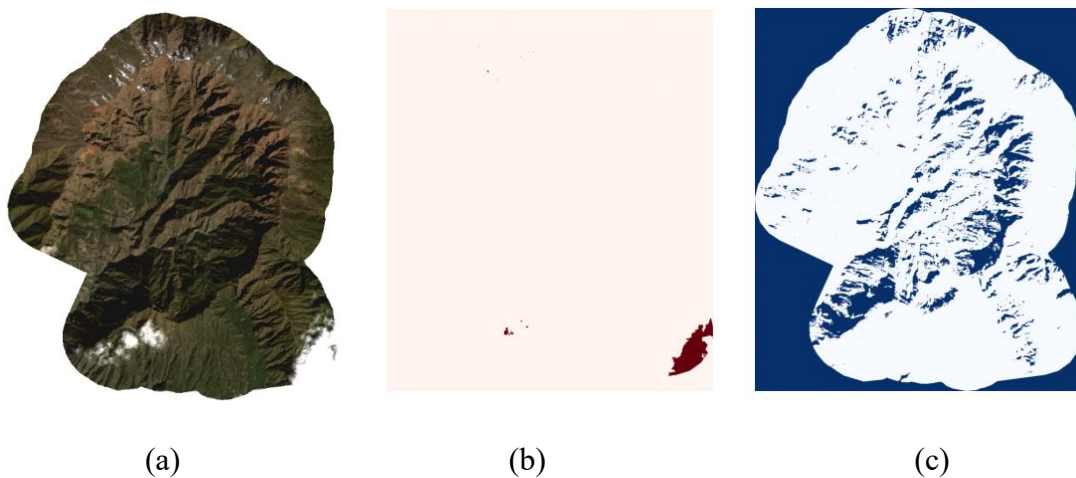


Figura 5.5. Eliminación de píxeles identificados como no válidos: (a) Imagen a la que se le aplicará la corrección radiométrica. (b) Máscara de nubes generada a partir de la imagen satelital del 24/02/2021. Las áreas en rojo indican presencia de nubes. (c) Máscara de sombras detectadas en la misma imagen. Las áreas en azul representan zonas con sombra orográfica.

Por tanto, los valores normalizados por banda (escalados a un rango $[0,1]$) obtenidos tras la aplicación de la máscara de nubes/sombras son los siguientes:

Porcentaje de píxeles válidos: 63.05%	
B1 (Coastal Blue)	Min: 0.0001, Max: 0.3509
B2 (Blue)	Min: 0.0073, Max: 0.3608
B3 (Green I)	Min: 0.0002, Max: 0.3655
B4 (Green)	Min: 0.0001, Max: 0.3613
B5 (Yellow)	Min: 0.0010, Max: 0.4347
B6 (Red)	Min: 0.0001, Max: 0.3961

B7 (Red Edge)	Min: 0.0001, Max: 0.3984
B8 (Infrared)	Min: 0.0500, Max: 0.4603

Obteniendo el mapa siguiente:



Figura 5.6. Máscara final generada para la imagen del 24/02/2021, donde los píxeles válidos (sin nubes ni sombras) se muestran en blanco.

Se puede ver todos los resultados de este proceso para las 16 fechas en el ANEXO II.

Asimismo, se incluye la visualización de la banda roja una vez corregida, en la que se han eliminado todos los píxeles contaminados por nubes y sombras. Esta corrección permite obtener una imagen limpia y representativa de la reflectancia real de la superficie, base indispensable para el cálculo de índices de vegetación fiables.



Figura 5.7. Banda roja corregida tras aplicar la máscara de nubes y sombras a la imagen PlanetScope del 24/02/2021. Los valores están normalizados entre 0 y 1.

En resumen, gracias a este proceso automatizado de detección y exclusión de píxeles problemáticos, se ha asegurado una base de datos robusta, homogénea y adecuada para el análisis multitemporal, sin necesidad de aplicar correcciones geométricas adicionales ni algoritmos complejos de restauración radiométrica.

5.5 Conclusión

Una vez finalizadas las tareas de preprocesamiento, se obtuvo una selección de 16 imágenes satelitales multiespectrales correspondientes al periodo 2021–2024, seleccionadas en base a su calidad visual y representación estacional. Cada una de estas imágenes ha sido sometida a un preprocesamiento que incluyó la generación de mosaicos (si fuera necesario), el recorte espacial al Parque Nacional de La Caldera de Taburiente por parcelas, y la corrección radiométrica, descartando zonas afectadas por nubes y sombras orográficas mediante una máscara.

Debido al relieve montañoso de La Palma, gran parte de las imágenes presentaban zonas en sombra, lo que justificó la necesidad de aplicar este tipo de corrección. Se optó por excluir del análisis aquellos píxeles no representativos de vegetación real, con el objetivo de obtener resultados fiables en la siguiente fase del estudio.

Como resultado, se dispone ahora de un conjunto de 16 imágenes limpias, normalizadas y georreferenciadas, listas para abordar la siguiente etapa: el cálculo de índices de vegetación y el análisis multitemporal por zonas específicas dentro del Parque Nacional, incluyendo parcelas de vegetación diferenciadas y una zona afectada por incendio.

Capítulo 6. Procesamiento de los Índices de Vegetación y Extracción de Resultados por Parcelas.

El Capítulo 6 detalla el procesamiento completo de los índices de vegetación a partir de las imágenes previamente corregidas. Se explican las técnicas de cálculo, normalización, selección y análisis estadístico aplicadas sobre parcelas representativas del Parque Nacional.

6.1. Introducción al procesamiento

Este capítulo tiene como objetivo describir con detalle el proceso de cálculo, selección y análisis de los índices de vegetación aplicados a las distintas parcelas de estudio dentro del Parque Nacional de la Caldera de Taburiente. A partir de las imágenes satelitales ya corregidas y validadas en el capítulo anterior, se inicia aquí la etapa del proyecto donde los datos multiespectrales se transforman en información útil para así poder cumplir con el objetivo de este TFG, que es ese valorar la evolución fenológica del Parque Nacional.

En el capítulo 5 se preprocesaron las imágenes eliminando nubes, sombras y fenómenos propios de zonas montañosas como La Palma. Este filtrado permitió obtener datos fiables, necesarios para garantizar la calidad del análisis que se desarrollará a continuación. Sin esa etapa previa, la presencia de píxeles distorsionados podría haber alterado los resultados de los índices.

6.1.1. Herramientas empleadas y entorno de desarrollo

Todo el procesamiento fue desarrollado en el entorno de Google Colab, lo cual permitió la ejecución del código en Python y el acceso a los archivos almacenados en Google Drive, tanto para la lectura de imágenes satelitales como para la exportación de resultados.

Las librerías en Python son paquetes de código reutilizable que contienen funciones y estructuras diseñadas para tareas concretas. Las principales librerías utilizadas fueron:

- **NumPy**: para operaciones matriciales y cálculo de índices. Esta librería fue esencial para aplicar operaciones matemáticas sobre los arrays que representan las bandas espectrales, permitiendo calcular los diferentes índices de vegetación, normalizarlos y gestionar valores nulos o extremos.
- **Rasterio**: para lectura, escritura y manipulación de archivos ráster. Resultó fundamental para la lectura y escritura de imágenes en formato GeoTIFF, permitiendo acceder a cada banda espectral de las imágenes corregidas y guardar los índices generados manteniendo su georreferenciación.
- **GeoPandas**: para cargar y manejar shapefiles con delimitaciones espaciales de las parcelas. Se utilizó para gestionar los shapefiles que definían las parcelas de vegetación del Parque Nacional, lo cual permitió extraer estadísticas zonales por tipo de vegetación. Gracias a ella, fue posible superponer la geometría vectorial

sobre las imágenes ráster y calcular la media o la varianza de los índices dentro de cada zona de estudio.

- **Matplotlib:** para la representación visual de los resultados. Nos permitió generar desde mapas de distribución espacial de los índices para la visualización directa una vez calculados, aunque posteriormente se crearon mapas propios en QGIS.
- **GDAL:** empleado previamente en el proceso de mosaico y recorte, y relevante en la gestión de archivos geoespaciales.

Tal y como se ha mencionado en capítulos anteriores, el trabajo se realizó de manera automatizada, donde cada imagen corregida fue procesada mediante scripts específicos que calculaban hasta 17 índices distintos. Los resultados fueron normalizados y almacenados en formato GeoTIFF, respetando la georreferenciación original y permitiendo su análisis tanto en Python como en QGIS.

6.2. Preparación de bandas espectrales para análisis multitemporal

Una vez completadas las correcciones radiométricas mediante máscaras de nubes y sombras, tal como se detalló en el apartado 5.4, el siguiente paso en el flujo de trabajo consistió en la preparación de las bandas multispectrales para su posterior uso en el cálculo de índices de vegetación. Este proceso es fundamental para garantizar la comparabilidad de los datos en un contexto multitemporal.

Aunque la aplicación de filtros de validez nos permitió centrarnos exclusivamente en los píxeles fiables de cada imagen, las bandas espectrales de PlanetScope requieren un paso adicional previo al análisis: la transformación a valores de reflectancia físicos. Esta operación, conocida como normalización, es fundamental para asegurar que los datos estén en el rango adecuado (0 - 1) que exigen la mayoría de las operaciones de cálculo de índices de vegetación [58].

6.2.1. Lectura y normalización de datos multibanda

Una vez aplicadas las máscaras de nubes y sombras, se procedió a la lectura de las imágenes multibanda corregidas. Las imágenes de PlanetScope están compuestas por ocho bandas espectrales, tal y como se describió en capítulos anteriores.

La lectura se realiza mediante la librería rasterio, que permite manipular los datos ráster de forma eficiente. Cada banda es extraída como un array de float32, donde posteriormente se aplican operaciones matemáticas píxel a píxel.

Uno de los pasos fundamentales previos al cálculo de índices de vegetación es la normalización de las bandas espectrales. Este paso, aunque sencillo en su implementación, tiene una gran relevancia para el análisis.

En el caso de las imágenes PlanetScope utilizadas en este proyecto, las bandas vienen almacenadas como enteros de 16 bits (uint16), y los valores de reflectancia han sido multiplicados por un factor de 10.000 por parte del proveedor, Planet. Esto se realiza por razones de almacenamiento y compatibilidad. Esta técnica es común en teledetección satelital y no afecta la información real, siempre que se aplique la corrección correspondiente antes del análisis, como hemos hecho en este caso.

Por tanto, para que los valores representen la reflectancia real de la superficie, es decir, la fracción de radiación solar reflejada por un píxel en un determinado rango espectral es imprescindible dividir todos los valores por 10.000. Esta operación devuelve los valores a un rango de 0.0 a 1.0, que es el intervalo estándar en el que operan la mayoría de los índices de vegetación.

A continuación, se presenta una tabla ejemplo de esta normalización de las bandas para la imagen con fecha 22/02/2021, tras aplicar la máscara de nubes y sombras.

Cabe destacar que los valores normalizados no coinciden con el resultado directo de dividir el valor máximo sin normalizar entre 10.000. Esto se debe a que la aplicación anterior de la máscara de nubes y sombras elimina determinados píxeles cuyos valores podían representar los máximos iniciales. Por tanto, los valores máximos de reflectancia se calculan únicamente sobre los píxeles válidos, lo que puede generar discrepancias respecto al “máximo bruto”. Esto garantiza que los datos utilizados reflejen únicamente la información válida de vegetación real.

Tabla 6.1. Valores mínimos y máximos de reflectancia por banda antes y después de la normalización (división por 10.000) con fecha de imagen 22/02/2021.

Bandas	Sin normalizar		Normalizado	
	Min	Max	Min	Max
B1(Coastal Blue)	0	6723	0.0001	0.3509
B2 (Blue)	0	6051	0.0073	0.3608
B3 (Green I)	0	7452	0.0002	0.3655
B4 (Green)	0	7225	0.0001	0.3613
B5 (Yellow)	0	8291	0.0010	0.4347

B6 (Red)	0	7518	0.0001	0.3961
B7 (Red Edge)	0	7594	0.0001	0.3984
B8 (Infrared)	0	8165	0.0500	0.4603

Esta tabla recoge los valores mínimos y máximos de reflectancia para cada una de las ocho bandas espectrales de las imágenes PlanetScope, tanto antes como después de aplicar la normalización por 10.000.

6.3 Cálculo y visualización de índices de vegetación

El cálculo de índices espectrales es una de las fases principales en el análisis multitemporal de vegetación. A partir de las bandas normalizadas y corregidas descritas en apartados anteriores, se implementó una rutina para generar hasta 17 índices de vegetación, agrupados en dos categorías: los denominados índices BBG, de banda ancha (basados en bandas del visible e infrarrojo cercano) y los NBG, de banda estrecha (basados en combinaciones con bandas del rojo, rojo edge, verde y amarillo). Este conjunto abarca los índices más reconocidos, como NDVI, SAVI o EVI, así como índices más recientes como MTVI2, MCARI2 o RENDVI, lo que permite capturar diferentes aspectos del estado de la vegetación.

6.3.1 Cálculo automatizado de índices

Cada imagen PlanetScope de las 16 fechas seleccionadas se procesó mediante un script desarrollado en Python, que extrae las 8 bandas espectrales normalizadas y calcula los índices de vegetación definidos mediante sus respectivas fórmulas. Para evitar distorsiones y asegurar una buena comparabilidad temporal, todos los índices fueron posteriormente normalizados en escala [0, 1]. Esto permite representar sus valores en una misma escala y visualizar los mapas generados de manera de manera lógica.

Este flujo comienza con la extracción de las bandas espectrales ya corregidas y normalizadas (tras la eliminación de nubes y sombras), y termina con la generación de mapas listos para su interpretación. Es decir, una vez que cada imagen fue preprocesada, se accedió a los arrays multibanda almacenados en la variable `imagen_corregida`, que contenía las 8 bandas PlanetScope con valores de reflectancia ya escalados a una magnitud (0 - 1). Estas bandas se separaron en variables individuales (B1 a B8) y se utilizaron como valor para el cálculo de los distintos índices.

Cada una de las fórmulas matemáticas que definían los índices se desarrollaron mediante dos notebooks independientes:

- **BBG.ipynb**, que contenía todas las funciones necesarias para calcular índices relacionados con vigor vegetal, como NDVI, SAVI, EVI, MSR o GNDVI.
- **NBG.ipynb**, con índices más específicos, relacionados con el pigmentos o estrés vegetal, como TCARI, MCARI2 o RENDVI.

Estos archivos .ipynb no contenían datos, sino únicamente las funciones matemáticas de cada índice. Por tanto, desde el script principal se llamaban directamente a estas funciones para procesar cada imagen:

```
%run "/content/gdrive/MyDrive/PROCESADO TFG/Code/BBG.ipynb"
```

```
NDVI = BBG_NDVI()
```

```
SAVI = BBG_SAVI()
```

```
EVI = BBG_EVI()
```

Una vez calculado cada índice como un array de valores numéricos, se aplicó una normalización min - max, ajustando todos los resultados al rango [0, 1]. Este paso fue fundamental para:

- Garantizar que todos los índices pudieran ser comparados entre sí gráfica y estadísticamente.
- Permitir su visualización con escalas de color homogéneas.
- Minimizar el impacto de diferencias en reflectancia derivadas de condiciones de captura, iluminación o pendiente.

Con los índices ya normalizados, se generaron automáticamente los mapas de visualización en el entorno de Google Colab, usando matplotlib, como ejemplo antes de la interpretación. A continuación, se muestra una figura donde se recoge los mapas generados para todos los índices para la fecha, por ejemplo, 28/06/2021.

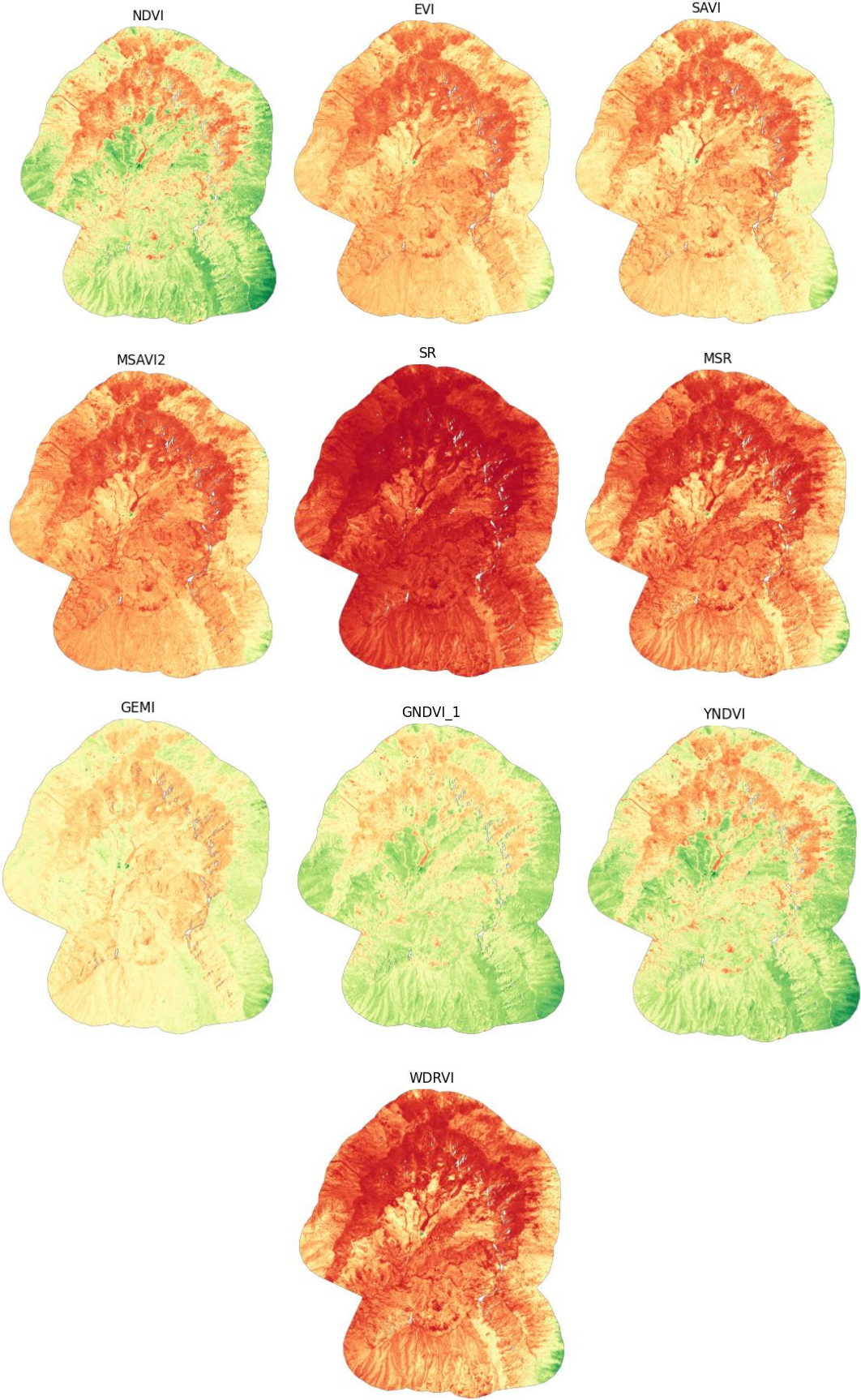


Figura 6.1. Visualización de los índices BBG generados a partir de la imagen PlanetScope del 28 de junio de 2021. Se muestran los mapas normalizados en el rango $[0,1]$.

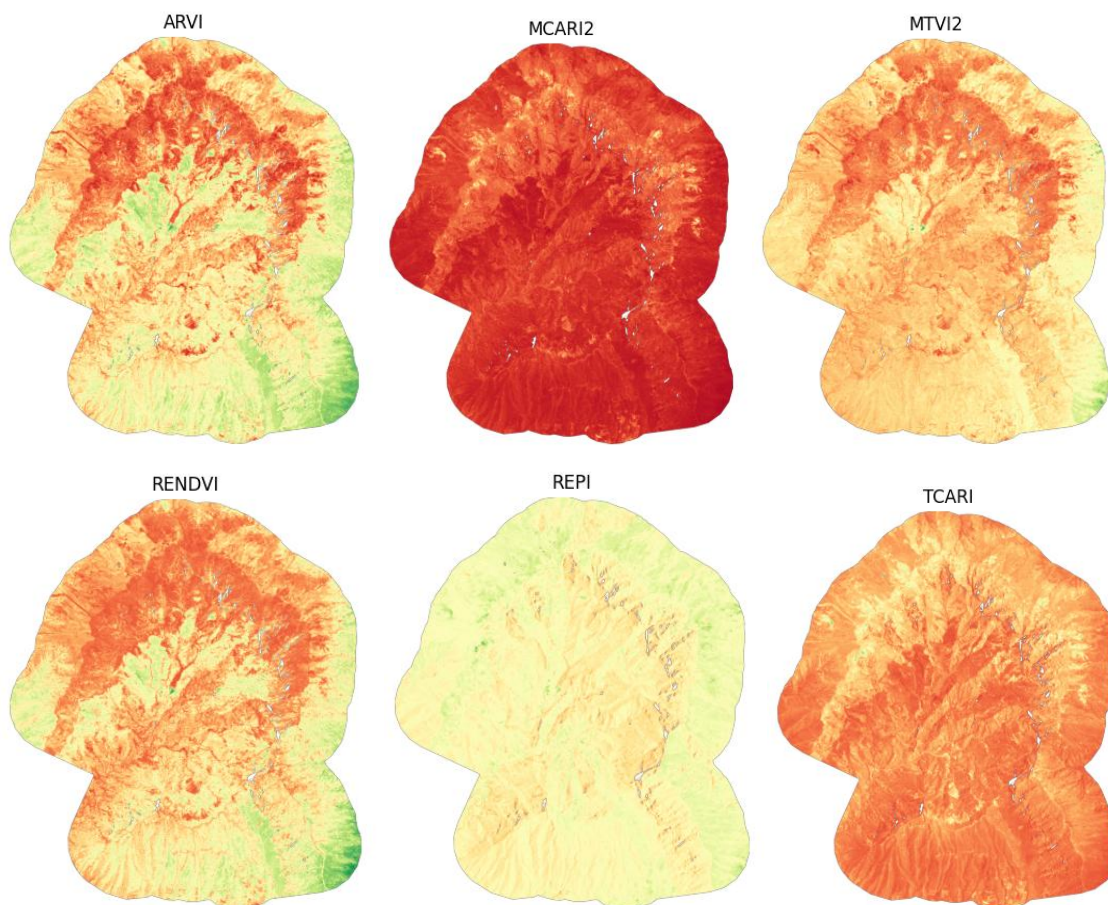


Figura 6.2. Visualización de los índices NGB generados a partir de la imagen PlanetScope del 28 de junio de 2021. Se muestran los mapas normalizados en el rango $[0,1]$.

Se puede ver todos los resultados de este proceso para las 16 fechas en el ANEXO IV.

Aunque estas figuras fueron útiles para visualizar patrones generales, los mapas definitivos se elaboraron manualmente en QGIS a partir de los archivos GeoTIFF exportados por el entorno Python. Esto permitió aplicar simbología personalizada, leyendas y capas vectoriales de referencia (parcelas, zonas de incendio, contorno del parque). A continuación, aparece un diagrama de flujo que resume el proceso seguido para la generación de los índices de vegetación a partir de las imágenes corregidas. Este esquema refleja de forma visual las principales etapas del script desarrollado, desde la

carga de las bandas espectrales ya preprocesadas, hasta la llamada a los notebooks donde se almacenan las fórmulas de cálculo (BBG.ipynb y NBG.ipynb). Posteriormente, se aplica la normalización min-max sobre los resultados obtenidos y se generan los mapas de salida correspondientes en formato GeoTIFF. Este flujo permite entender la lógica del código.

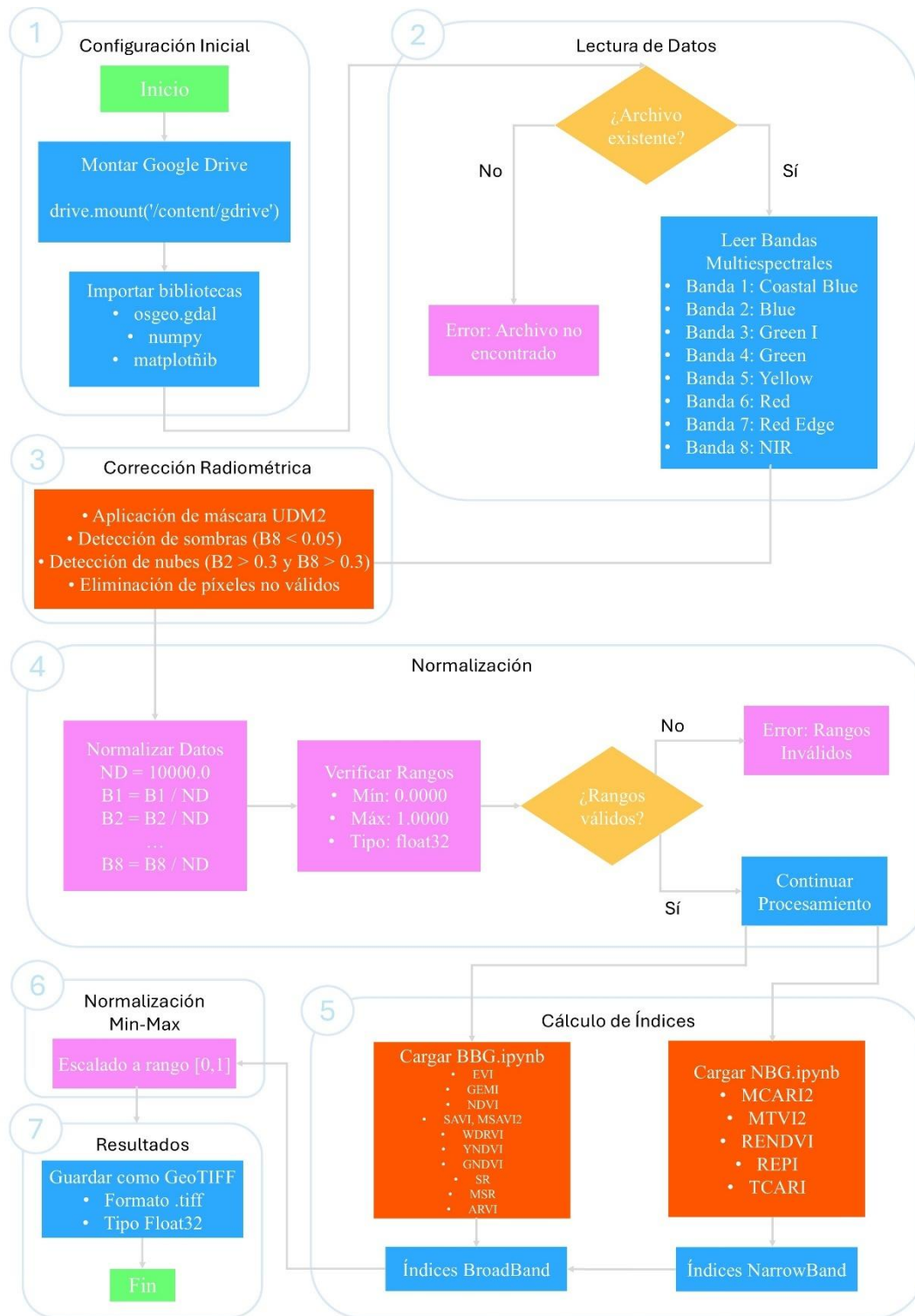


Figura 6.3. Diagrama de flujo del proceso automatizado de generación de índices de vegetación a partir de imágenes PlanetScope.

6.4 Evaluación de los índices generados

Una vez calculados los 17 índices de vegetación propuestos, se llevó a cabo un análisis para determinar cuáles de ellos ofrecían una mejor respuesta fenológica y capacidad de diferenciación entre tipos de vegetación. Esta evaluación permitió simplificar el análisis y centrarse en un grupo reducido de índices que representan bien la información necesaria.

6.4.1 Criterios de selección

La selección se basó en dos criterios principales:

- **Varianza temporal:** se calculó la varianza de los valores medios de cada índice a lo largo del tiempo para cada parcela, y posteriormente se obtuvo la media de esas varianzas. Este criterio permite identificar qué índices presentan una mayor sensibilidad a los cambios estacionales o entre años.
- **Capacidad de discriminación entre coberturas:** se analizó la distribución de valores por índice y por tipo de vegetación (parcela) para evaluar su capacidad de discriminación. Un buen índice muestra patrones claros y distintos entre formaciones vegetales como pinares o matorrales, permitiendo distinguir su respuesta fenológica.

6.4.2 Resultados del análisis

Los resultados se organizaron en un archivo Excel, donde para cada combinación fecha-índice-parcela se extrajeron estadísticas como la media, desviación típica, máximo y mínimo. En total se analizaron 17 imágenes correspondientes al periodo 2020 - 2024, lo que permitió disponer de una serie temporal suficiente para caracterizar la evolución fenológica de cada índice. A partir de estos datos se elaboraron dos gráficos:

- **Gráfico de barras:** muestra la varianza temporal promedio de cada índice, permitiendo identificar aquellos más sensibles a los cambios fenológicos (Ej. TCARI y REPI).

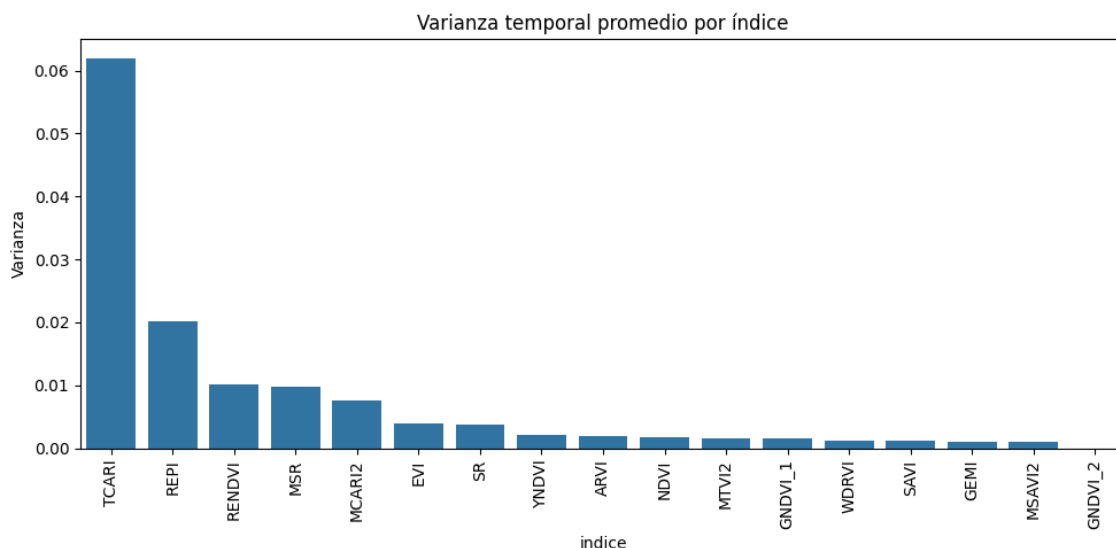


Figura 6.4. Varianza temporal promedio de los 17 índices calculados.

- **Gráfico de cajas (boxplot):** representa la distribución de valores por tipo de vegetación (parcelas) e índice. Se observó que ciertos índices como NDVI o SAVI presentaban valores agrupados pero distinguibles por tipo de vegetación, mientras que otros, como MCARI2 o SR muestran menor variabilidad, lo que puede limitar su utilidad para distinguir tipos de vegetación.

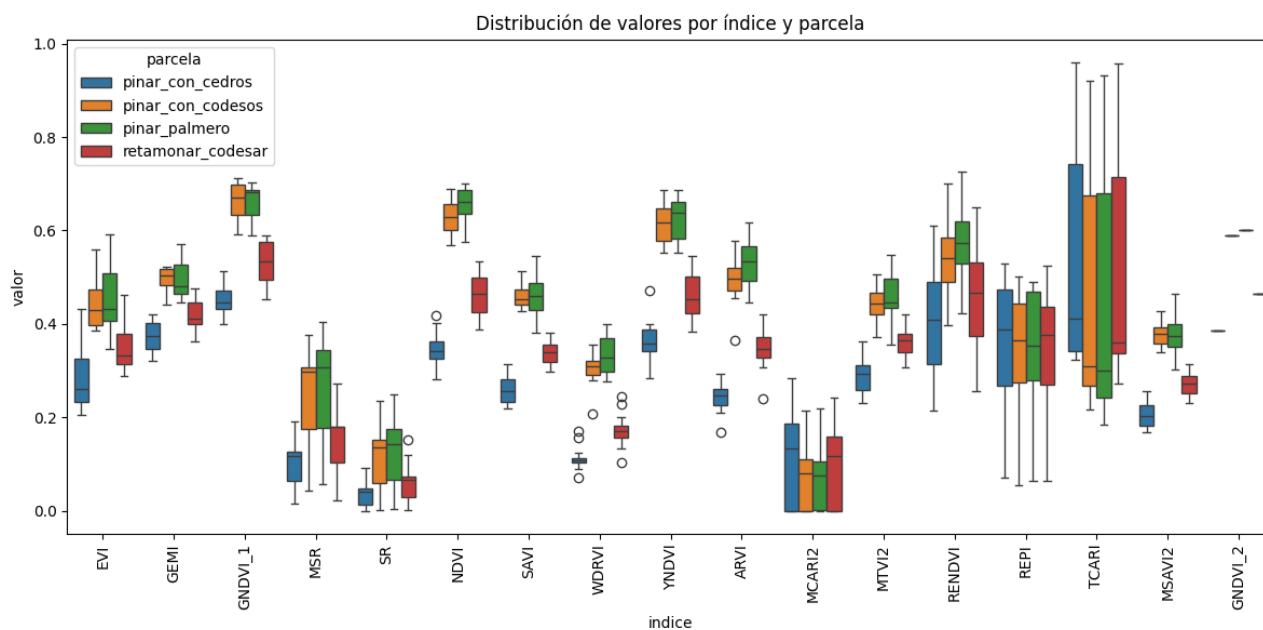


Figura 6.5. Distribución de valores de índices por parcela (boxplot).

Estos resultados permitieron descartar índices con baja varianza o nula capacidad de discriminación, y enfocar la atención en aquellos con mejor comportamiento.

6.4.3 Selección final de índices

La combinación de ambos análisis, varianza temporal y distribución por parcela permitió establecer una base sólida para seleccionar los índices más adecuados. Por un lado, el gráfico de barras mostró que índices como TCARI y RENDVI presentaban una elevada varianza media a lo largo del tiempo, lo cual sugiere una alta sensibilidad para detectar cambios fenológicos, especialmente en entornos con gran estacionalidad como La Caldera de Taburiente.

Por otro lado, el boxplot demostró que TCARI y RENDVI, junto a NDVI y SAVI, ofrecían una clara capacidad de discriminación entre tipos de vegetación, al mostrar distribuciones diferenciadas y mínimas superposiciones entre parcelas.

Considerando los criterios anteriores, y apoyándose tanto en los resultados numéricos como en la literatura científica, se seleccionaron cuatro índices para el análisis multitemporal final:

- **NDVI:** índice clásico y generalmente validado, sensible a la biomasa y a la actividad fotosintética.
- **SAVI:** variante del NDVI que corrige efectos del suelo, ideal para zonas de vegetación no muy densa, como es este caso.
- **RENDVI:** utiliza el canal del rojo edge, ofreciendo mejor sensibilidad en zonas con vegetación densa.
- **TCARI:** índice sensible al contenido de clorofila, útil para detectar cambios fisiológicos en las plantas.

El análisis permitió identificar los índices de vegetación más adecuados para este estudio, combinando criterios estadísticos y fundamentos teóricos. La selección final de NDVI, SAVI, RENDVI y TCARI ofrece un conjunto representativo para analizar la vegetación en el parque, facilitando una interpretación clara de los resultados.

6.5 Estadísticas zonales por parcela y fecha

Una vez finalizado el proceso de cálculo y selección de los índices de vegetación (NDVI, SAVI, RENDVI y TCARI), el siguiente paso en este Trabajo de Fin de Grado ha sido hacer un análisis estadístico zonal que permita evaluar la evolución temporal de la vegetación en distintas formaciones ecológicas del Parque Nacional de la Caldera de

Taburiente. Este enfoque busca cuantificar, cómo varían los valores medios, extremos y la estabilidad de los índices a lo largo del tiempo en zonas geográficas específicas con diferente tipo de cubierta vegetal, incluyendo una zona afectada por incendio.

El análisis zonal es una técnica habitual en estudios de teledetección aplicada [59], y permite extraer estadísticas como la media, el valor mínimo, el máximo y la desviación estándar de los píxeles dentro de un polígono vectorial, en este caso, shapefiles correspondientes a cada una de las parcelas definidas. Estas estadísticas son fundamentales no solo para describir el comportamiento general de los índices, sino también para detectar cambios, episodios de estrés vegetal, o diferencias entre formaciones vegetales.

6.5.1 Objetivos del análisis estadístico zonal

Desde el punto de vista ecológico, este enfoque permite analizar por separado cómo se comporta la vegetación en cada tipo de zona del parque, de forma que se puedan identificar patrones propios de cada tipo de vegetación y compararlos entre sí. En este trabajo se analizaron cinco parcelas principalmente: cuatro correspondientes a formaciones vegetales dominantes dentro del parque (pinar con cedros, pinar con codesos de cumbre, pinar palmero y retamón - codesar) y una quinta zona afectada por un incendio, delimitada manualmente sobre imágenes satelitales.

Desde el enfoque metodológico, este análisis es posible gracias a la estructura ordenada del flujo de trabajo y al uso de imágenes previamente corregidas y normalizadas, lo que garantiza coherencia en las comparaciones temporales. Todas las imágenes analizadas pasaron por un proceso de preprocesado que incluyó la aplicación de máscaras de nubes y sombras, así como la normalización radiométrica de las bandas, lo cual garantiza que los valores sobre los que se aplican las estadísticas zonales sean comparables entre fechas, y representen la vegetación real.

La extracción de estadísticas zonales se aplicó a todas las fechas e índices sobre cada una de las zonas de interés, permitiendo calcular valores como la media, el mínimo, el máximo y la desviación estándar. Los resultados obtenidos fueron organizados en un archivo Excel con múltiples hojas, estructurado por índice, y constituyen la base para los análisis gráficos posteriores. Estos análisis incluyen la evolución temporal por parcela, la representación de rangos dinámicos y la comparación mediante diagramas de caja, que se desarrollan en los subapartados siguientes.

6.5.2 Delimitación de zonas de análisis

Con el objetivo de descomponer el comportamiento fenológico de la vegetación dentro del Parque Nacional de la Caldera de Taburiente, se definieron cinco parcelas de análisis. Estas zonas fueron seleccionadas por su representatividad ecológica y por su interés en el contexto del estudio, especialmente tras eventos como el incendio de 2023.

Estas parcelas se delimitan mediante archivos vectoriales tipo shapefile, generados a partir de información geoespacial de referencia. Para las formaciones vegetales, se utilizó una capa temática descargada desde la Infraestructura de Datos Espaciales de Canarias [60], que clasifica el territorio insular en unidades de vegetación. Dentro del Parque Nacional, se seleccionaron las cuatro formaciones con mayor superficie y relevancia fenológica, además de una quinta zona correspondiente a la superficie afectada por el incendio, delimitada manualmente.

Como se mencionó en el capítulo anterior, las cinco zonas analizadas son:

- Pinar con cedros.
- Pinar con codesos de cumbre.
- Pinar palmero.
- Retamonar-codesar.
- Zona afectada por incendio: Área que sufrió afectación por el incendio forestal registrado en el año 2023. Fue digitalizada manualmente mediante herramientas de QGIS, dibujando un polígono a partir de las imágenes satelitales post-incendio. Si bien la delimitación es aproximada, resulta suficientemente representativa para evaluar el impacto y la recuperación de la vegetación tras el evento.

A continuación, se presenta una visualización detallada de las cinco parcelas utilizadas para el análisis zonal en este estudio. Estas parcelas representan las principales formaciones vegetales del Parque Nacional de la Caldera de Taburiente, así como la zona afectada por el incendio de 2023. Cada polígono ha sido proyectado sobre el mosaico satelital de referencia para facilitar su interpretación espacial. Esta figura permite contextualizar geográficamente las zonas de análisis, observar su distribución dentro del parque y comprobar visualmente su localización relativa frente al relieve

montañoso de la Caldera, lo que resulta clave para comprender los resultados posteriores.

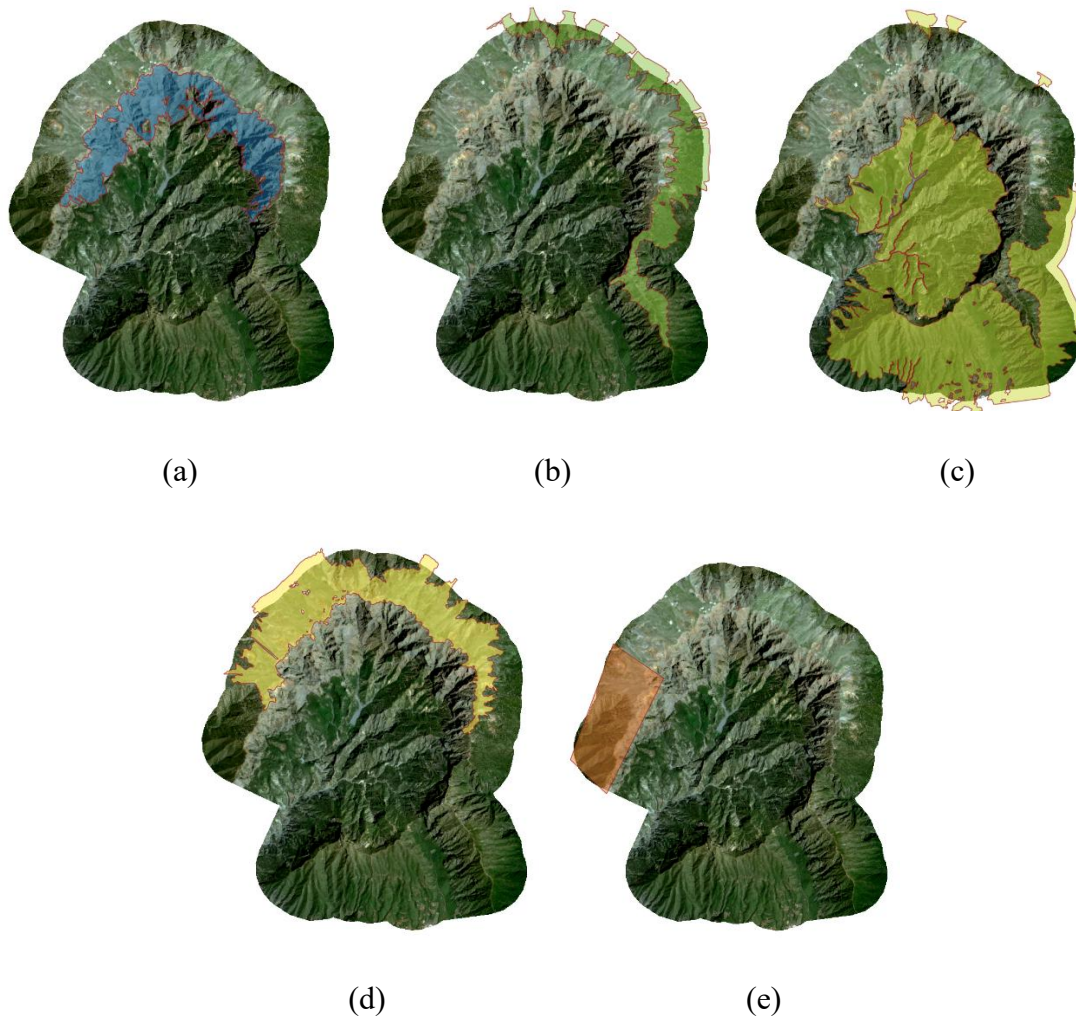


Figura 6.6. Distribución espacial de las parcelas de estudio sobre el mosaico de la Caldera de Taburiente: (a) Pinar con cedros. (b) Pinar con codesos de cumbre. (c) Pinar palmero. (d) Retamonar codesar. (e) Zona incendio.

La superposición parcial observada en algunas parcelas, donde estas exceden ligeramente los límites del mosaico ráster, se debe a que los shapefiles utilizados para definir las zonas de análisis provienen de una capa de vegetación completa de la isla, con geometrías que abarcan más allá de la zona recortada para el análisis (la Caldera de Taburiente).

Dado que las imágenes PlanetScope ya venían recortadas al contorno del parque y se utilizaron únicamente las zonas dentro del ráster para el análisis, estos solapes no afectaron al cálculo de estadísticas. En la práctica, durante el proceso de extracción

zonal, únicamente los píxeles coincidentes entre ráster y polígono fueron considerados, y las áreas fuera del ráster fueron descartadas. El enmascaramiento espacial asegura que el análisis se limite a los datos válidos y disponibles dentro del área de cobertura de las imágenes satelitales.

Para extraer los valores de cada índice de vegetación en las zonas delimitadas, fue necesario realizar este recorte espacial de los rásteres por medio de los shapefiles. Este procedimiento consiste en aplicar una operación de recorte sobre cada imagen, conservando únicamente los píxeles que se encuentran dentro de la geometría del shapefile.

Antes de aplicar este recorte, se realizó una reproyección de cada shapefile al sistema de coordenadas del ráster, garantizando su compatibilidad espacial. Todas las imágenes PlanetScope utilizadas están proyectadas en WGS 84 / UTM zona 28N (EPSG:32628), por lo que los vectores fueron transformados a ese sistema mediante procesos automatizados. Este paso fue esencial para asegurar que los polígonos coincidieran exactamente con las posiciones de los píxeles en el espacio. De lo contrario, podrían producirse errores de alineación y pérdida de datos relevantes.

Esta división en parcelas permite aplicar el análisis de los índices de vegetación de forma más precisa y significativa. En lugar de calcular estadísticas sobre todo el parque (lo que atenua las diferencias locales), se obtiene una caracterización detallada por tipo de vegetación. Esto proporciona una base para evaluar:

- Cambios fenológicos a lo largo del tiempo.
- Diferencias en respuesta al estrés climático.
- Dinámicas de recuperación post - incendio.
- Comportamiento comparativo entre formaciones vegetales.

6.5.3 Representación espacial de los índices de vegetación

Como complemento a la extracción de estadísticas por parcela, se elaboraron mapas de los índices NDVI, SAVI, TCARI y RENDVI para distintas fechas a lo largo del periodo de estudio. Estas representaciones permiten visualizar con detalle la distribución del vigor de la vegetación dentro de la Caldera de Taburiente y sus principales formaciones,

lo que ayuda a identificar detalles o diferencias que no se pueden apreciar solo con los valores numéricos.

Se seleccionaron fechas clave que reflejan diferentes estados fenológicos y condiciones climáticas (por ejemplo, estaciones secas o húmedas), lo que permite comparar visualmente la respuesta de la vegetación ante dichos cambios.

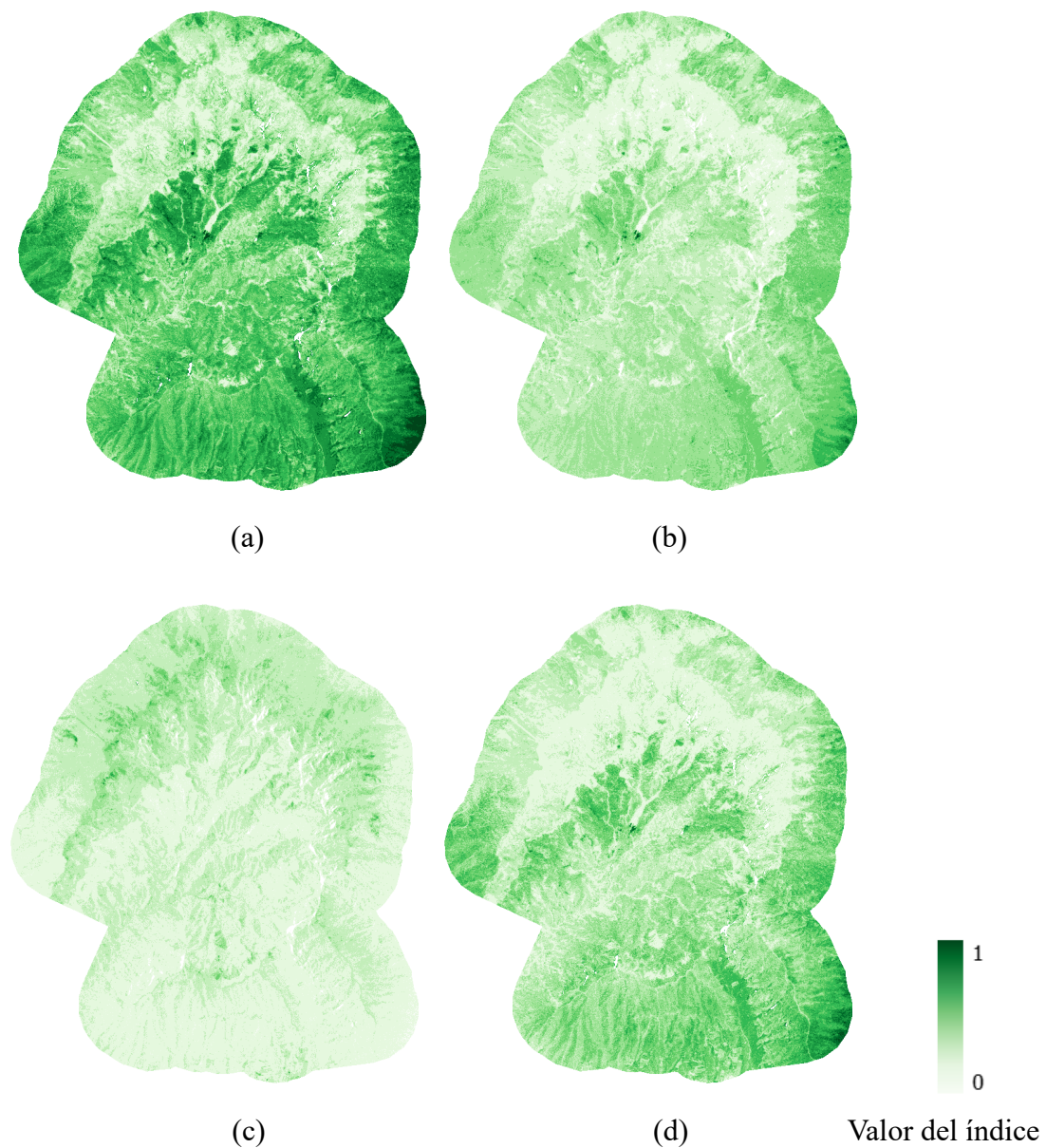


Figura 6.7. Mapas temáticos de los cuatro índices de vegetación calculados en QGIS para el 28 de junio de 2021. La escala de color representa el valor del índice entre 0 y 1. (a): NDVI, (b): SAVI, (c): TCARI, (d): RENDVI.

La representación de los cuatro índices seleccionados (NDVI, SAVI, TCARI y RENDVI) para la fecha del 28 de junio de 2021 permite ver de forma detallada el estado de la vegetación en el interior de la Caldera de Taburiente. Estos mapas complementan el análisis estadístico previo y confirman de manera visual las diferencias en sensibilidad y comportamiento detectadas mediante la varianza temporal y la discriminación por parcelas.

En primer lugar, el NDVI muestra un patrón muy definido, con valores elevados en las zonas de pinar y áreas con vegetación densa, mientras que las zonas de barranco y las más expuestas presentan valores menores. Su respuesta, permite distinguir las principales formaciones vegetales, lo cual coincide con su buen desempeño observado en el análisis de distribución por parcelas.

Por otra parte, el SAVI presenta un gradiente similar al NDVI, pero con menos efecto del suelo en áreas de vegetación menos densa. Este comportamiento se puede ver en las laderas más abiertas y en zonas de transición hacia matorral, donde el índice ofrece una representación más equilibrada y menos influida por la reflectancia del suelo.

El índice TCARI destaca por su mayor sensibilidad a variaciones en el contenido de clorofila. En el mapa se observa que los contrastes son más suaves y los valores en general son más bajos que en los índices anteriores. No obstante, las diferencias entre áreas de pinar denso y zonas más abiertas siguen siendo evidentes, lo que concuerda con la elevada varianza temporal que mostró este índice a lo largo de la serie multitemporal.

Finalmente, el RENDVI presenta una respuesta más intensa en las áreas de vegetación densa, gracias a la presencia de la banda red edge, que aumenta su capacidad para distinguir variaciones de vigor en coberturas con mucha vegetación. Este comportamiento coincide plenamente con los resultados del análisis estadístico, donde RENDVI se posicionó como uno de los índices con mayor capacidad de diferenciación entre tipos de vegetación.

Los cuatro índices analizados aportan perspectivas complementarias sobre el estado de la vegetación: el NDVI destaca por su capacidad para representar el vigor general y diferenciar con claridad las zonas de vegetación densas de aquellas más abiertas; el SAVI, al corregir la influencia del suelo, ofrece una representación más precisa en áreas con cobertura parcial o donde esta es visible; el TCARI es especialmente sensible al contenido de clorofila, permitiendo detectar cambios fisiológicos y estados de estrés

incluso cuando no hay variaciones estructurales evidentes; y el RENDVI, gracias al uso del red edge, responde de forma más eficaz en zonas de vegetación densa donde otros índices pueden llegar a saturarse. En conjunto, estos índices permiten caracterizar simultáneamente el vigor, la influencia del suelo, la actividad química y el comportamiento de la vegetación en condiciones de alta biomasa, proporcionando una visión integral del estado y la dinámica de la cubierta vegetal.

Dado que estos mapas permiten visualizar la función de cada índice y la forma en que destacan distintas propiedades de la vegetación, se procedió a generar representaciones espaciales para todas las fechas y para todos los índices. Esta colección completa de mapas se incluye en el Anexo IV, donde se pueden consultar de forma detallada estas variaciones a lo largo del periodo 2021 - 2024.

En conjunto, estos mapas no solo ilustran la distribución espacial del estado de la vegetación, sino que también refuerzan el proceso de selección de índices realizado en apartados anteriores. La coherencia entre los patrones espaciales observados y los análisis estadísticos confirma que NDVI, SAVI, TCARI y RENDVI constituyen un conjunto adecuado para el análisis en el Parque Nacional de la Caldera de Taburiente.

A partir de estos mapas, y con los valores de los índices calculados para todas las fechas, fue posible iniciar el análisis temporal orientado al análisis de la vegetación en cada una de las parcelas, que constituyen el siguiente paso y se desarrolla en los apartados posteriores.

6.5.4 Organización de resultados para el análisis gráfico

Una vez calculadas las estadísticas por zona de cada índice (media, mínimo, máximo y desviación estándar), se organizó toda esta información de forma clara. Para ello, se elaboró un archivo Excel con múltiples hojas, donde cada índice cuenta con su propia pestaña. Esto permite tener una visión ordenada y separada de los datos por índice, parcela y fecha.

Este archivo ha sido clave para generar los gráficos utilizados en los siguientes apartados. Gracias a esto, ha sido posible representar de forma visual la evolución de los índices a lo largo del tiempo en cada una de las parcelas de estudio, lo que facilita la interpretación de los patrones fenológicos observados.

6.5.5 Visualización temporal de los índices por parcela

El análisis visual de la evolución temporal de los índices de vegetación en la Caldera de Taburiente es relevante debido a su complejidad ecológica y topográfica. Esta zona, alberga una gran diversidad de formaciones vegetales distribuidas a lo largo de grandes altitudes, lo que permite identificar patrones fenológicos diferenciados y posibles respuestas a condiciones climáticas. La evolución conjunta de índices como NDVI, SAVI, RENDVI o TCARI permite así detectar posibles fluctuaciones en la actividad vegetal, además de eventos de estrés fisiológico o incluso la recuperación post-incendio en zonas afectadas, ayudando a interpretar la dinámica vegetal del parque nacional en su conjunto. En este trabajo se han generado múltiples gráficos de series temporales para los índices nombrados, cubriendo el periodo 2021 - 2024 y abarcando cinco parcelas representativas: cuatro formaciones vegetales naturales y una zona afectada por incendio.

Los gráficos se organizaron en tres bloques:

- Evolución media de cada índice en cada parcela. Muestra la tendencia general de cada índice en el tiempo, permitiendo identificar patrones fenológicos como brotaciones primaverales o estrés estival.
- Bandas de variabilidad ($\pm$ desviación estándar). Refleja la variabilidad interna dentro de cada parcela, útil para detectar heterogeneidad estructural o zonas con respuestas atípicas.
- Rango completo (mínimos y máximos por fecha). Destaca los valores extremos registrados en cada fecha, facilitando la detección de anomalías, cambios bruscos o comportamientos fuera de lo esperado.

A continuación, se procede a hacer un análisis para los resultados obtenidos.

Dado el volumen total de gráficos generados (más de 60 combinaciones entre índices y parcelas), se ha optado por incluir en el cuerpo del TFG solo una selección representativa, dejando el resto documentado en el Anexo V. Por ello, se han seleccionado aquellos gráficos que mejor sintetizan los resultados, siguiendo un criterio que busca mostrar al menos un gráfico representativo por tipo de formación vegetal, además de una comparación conjunta por índice y una visualización estacional general.

- Pinar con Cedros: Índice SAVI con desviación estándar.

El SAVI es ideal para este tipo de vegetación, ya que está diseñado para compensar el efecto del suelo desnudo, especialmente útil en formaciones abiertas como el pinar con cedros, donde la cobertura en ocasiones puede ser discontinua.

La siguiente figura muestra la evolución temporal del índice SAVI en la parcela de Pinar con Cedros, incorporando una banda de desviación estándar para representar la variabilidad interna del índice a lo largo del periodo de estudio. Se trata de una de las formaciones con mayor cobertura forestal de la Caldera, donde este índice resulta especialmente útil para evaluar el vigor de la vegetación en función de su densidad y cobertura del suelo.

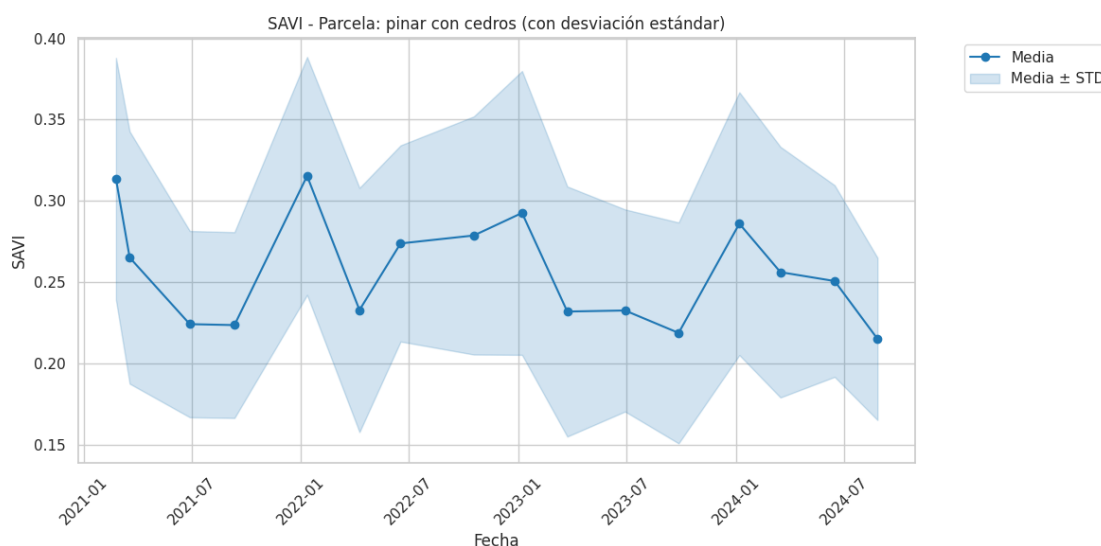


Figura 6.8. Evolución temporal del índice SAVI en la parcela “Pinar con Cedros” (2021 - 2024), incluyendo banda de desviación estándar.

El gráfico del índice SAVI para la parcela de Pinar con Cedros muestra una evolución temporal con valores relativamente estables a lo largo de los cuatro años, con ligeras oscilaciones y máximos en los meses de invierno (enero de 2022 y 2023, así como febrero de 2021). Esta tendencia es coherente con la fenología del pinar canario, que puede mantener o incluso aumentar su actividad fotosintética durante el invierno debido a la mayor disponibilidad hídrica y temperaturas suaves en esta región de la isla.

Por el contrario, se pueden apreciar ciertos descensos durante la primavera y el inicio del verano, en especial en abril de 2023 y junio de 2022, que podrían parecer inesperados dado el comportamiento habitual del pino canario. Sin embargo, estos

valores más bajos pueden estar relacionados con la fenología propia de esta especie, que suele presentar una ligera reducción de vigor en los meses previos al verano debido al aumento del estrés hídrico y a la transición hacia condiciones más secas. Además, no puede descartarse la influencia de condiciones atmosféricas puntuales (como presencia de calima, nubosidad alta o ligeras variaciones en la iluminación) que pueden afectar a la reflectancia registrada por el satélite y, en consecuencia, a la estimación del índice de vegetación.

Además, la banda de desviación estándar muestra que en algunos momentos del año hay mucha variación dentro del pinar, es decir, la amplitud de la banda de desviación estándar refleja cierta variabilidad interna dentro de la parcela, probablemente por diferencias en la densidad de la vegetación, la humedad del suelo o la orientación del terreno. Esto indica que el SAVI es útil para detectar estas diferencias dentro de la parcela.

En resumen, el índice SAVI en el pinar con cedros muestra que esta vegetación se mantiene activa en invierno, mientras que las bajadas en primavera podrían deberse más a sombras del terreno que a una pérdida real de vegetación. Además, el gráfico indica que hay zonas dentro del pinar con más variación que otras, lo que hace que este índice sea útil para detectar diferencias dentro de la parcela.

- Pinar con Codesos de Cumbre: Índice TCARI con rango min-máx

Se seleccionó el índice TCARI para analizar la parcela Pinar con Codesos de Cumbre porque este índice está diseñado para detectar diferencias en la cantidad y eficiencia de la clorofila, lo cual es muy útil en vegetación de tipo matorral como el codeso.

Los codesos presentan una fenología muy marcada y responden de forma sensible a la disponibilidad de agua y a condiciones de insolación, por lo que su actividad fotosintética puede variar mucho en función del momento del año. TCARI es muy adecuado para captar esos cambios.

La Figura 6.9 muestra la evolución temporal del índice TCARI en la parcela de “Pinar con Codesos de Cumbre”, representando tanto la media por fecha como el rango completo de valores (mínimo y máximo). Esta visualización permite detectar tanto la tendencia general como la amplitud de respuestas dentro de la parcela, siendo

especialmente útil en formaciones vegetales con cierta heterogeneidad estructural como esta.

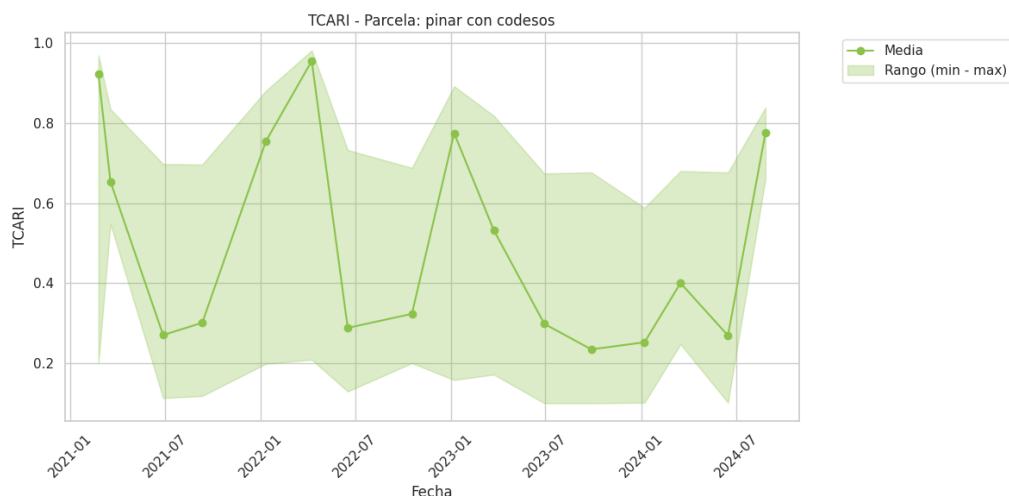


Figura 6.9. Evolución temporal del índice TCARI en la parcela de Pinar con Codesos de Cumbre.

En el gráfico del índice TCARI para la parcela de Pinar con Codesos de Cumbre se observa una evolución muy marcada, con picos altos en los meses de invierno (como enero de 2022 y 2023) y caídas claras en verano. Este comportamiento refleja bien la estacionalidad de este tipo de vegetación, formada por arbustos como el codeso, que suelen mostrar más actividad en épocas frescas y húmedas, y reducen su vigor en los meses más secos.

Los máximos más altos del índice, observados en enero de 2022 y principios de 2023, podrían indicar momentos de máxima acumulación de clorofila, coincidiendo con condiciones más húmedas típicas del invierno. Por el contrario, los valores más bajos en los meses de verano (junio - julio) reflejan un posible estrés hídrico.

Además, el área sombreada del gráfico, que representa la diferencia entre los valores mínimos y máximos, es bastante amplia en muchas fechas. Esto indica una variabilidad interna notable dentro de la parcela, asociada no solo a diferencias en la densidad y estructura del matorral, sino también al hecho de que el polígono de la parcela incluye inevitablemente zonas de suelo desnudo. Por tanto, las estadísticas reflejan en realidad la respuesta conjunta de vegetación más suelo, lo que amplifica el rango de valores y explica parte de la dispersión observada. En definitiva, el TCARI capta de manera

adecuada tanto los cambios estacionales propios del codesar como la heterogeneidad interna derivada de esta mezcla de coberturas.

- Pinar Palmero: Índice RENDVI con media.

Para el Pinar Palmero, el índice RENDVI fue seleccionado por su sensibilidad a diferencias de vigor vegetativo en coberturas densas, como ocurre en zonas de pinares. La elección del gráfico de línea con rango min-máx permite representar tanto la tendencia general como la dispersión extrema de valores en esta parcela, que suele presentar una cobertura cerrada pero también ciertas heterogeneidades topográficas.

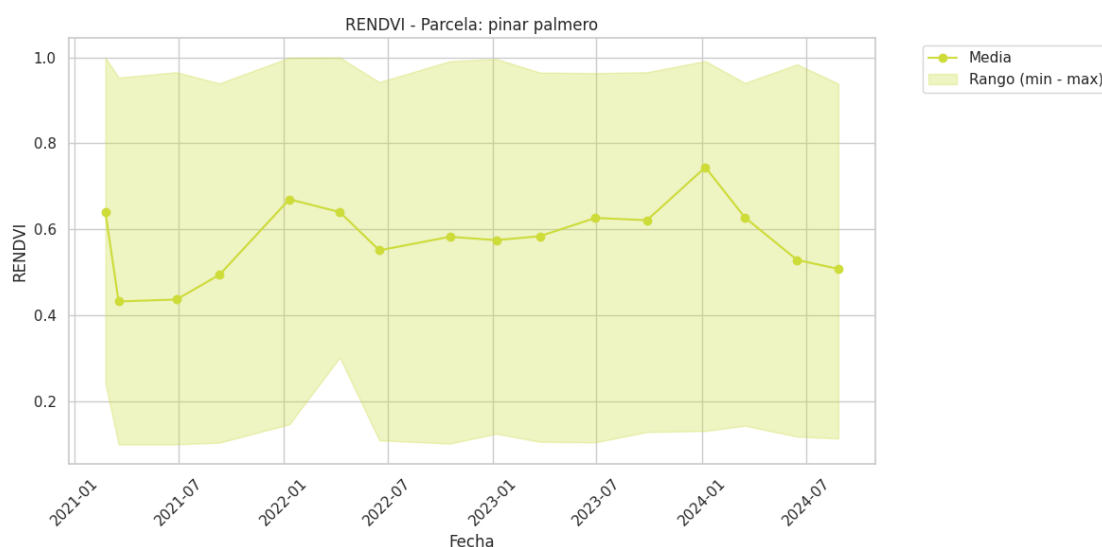


Figura 6.10. Evolución temporal del índice RENDVI en la parcela de Pinar Palmero.

En el gráfico se observa una tendencia general bastante estable, con valores de media que oscilan entre 0.45 y 0.75 a lo largo del periodo analizado. Destaca un pequeño repunte en los meses invernales de 2022 y 2024, relacionado con una mayor disponibilidad hídrica y condiciones climáticas favorables para el crecimiento. El amplio rango de valores reflejado en la banda sombreada indica una variabilidad interna considerable dentro de la parcela, no solo por diferencias en la densidad y estructura de la vegetación o en la exposición solar, sino también porque el polígono incluye áreas de suelo desnudo. Por tanto, las estadísticas representan la respuesta conjunta vegetación más suelo, lo que amplifica la dispersión observada. En este contexto, el RENDVI, al incorporar la banda del red edge, resulta especialmente útil para detectar pequeñas variaciones dentro de una cubierta que, en apariencia, podría considerarse homogénea.

Esta mayor estabilidad en los valores del índice RENDVI podría explicarse por el propio tipo de vegetación dominante en la parcela: el pinar palmero, una formación densa y bien adaptada a las condiciones de la Caldera. Además, muchas de estas zonas se encuentran en áreas más resguardadas topográficamente, como laderas menos empinadas, lo que favorece un microclima más constante. Esta localización reduce la exposición a factores extremos como sequía, viento o sombras orográficas, y eso se traduce en una respuesta espectral más homogénea a lo largo del año.

En resumen, la estabilidad observada en los valores del RENDVI en el pinar palmero refleja la adaptabilidad y resistencia de esta formación vegetal. Su estructura densa y su ubicación protegida dentro de la Caldera favorecen un comportamiento fenológico más constante. Esto convierte al RENDVI en un buen indicador para evaluar la salud de este tipo de pinar.

- Retamonar-Codesar: Índice NDVI con min-máx.

Se utiliza el NDVI por ser un indicador clásico y robusto para analizar la cobertura y el vigor vegetal en ecosistemas de arbustos. En el caso del retamonar-codesar, permite detectar con claridad tanto los momentos de máximo desarrollo como los descensos estacionales en la actividad fotosintética.

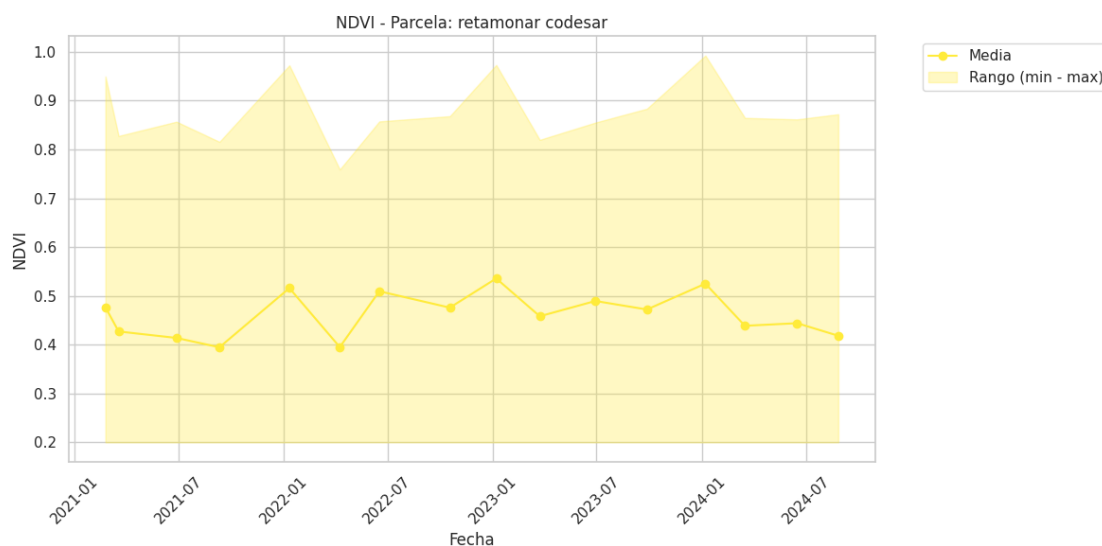


Figura 6.11. Evolución del NDVI en la parcela de retamonar-codesar, con banda de rango min-máx.

La evolución del NDVI en la parcela de retamonar-codesar muestra una tendencia relativamente estable a lo largo del periodo de estudio, con valores medios que oscilan

en torno al 0.45–0.50. Aunque el rango min-máx es amplio, la línea de media se mantiene dentro de un intervalo acotado, lo que refleja un comportamiento vegetativo más homogéneo a lo largo del tiempo. Esta estabilidad puede estar relacionada con la naturaleza del retamar y el codesar, que son formaciones más abiertas y menos sensibles a cambios de humedad o temperatura. Además, se observa una ligera tendencia a valores más bajos entre primavera y verano, relacionado con un periodo de mayor estrés hídrico.

En resumen, la parcela de retamónar-codesar presenta un comportamiento vegetativo bastante constante, con variaciones suaves entre estaciones. Esto sugiere que la cobertura arbustiva responde de forma moderada a los cambios ambientales, manteniendo una actividad relativamente estable a lo largo del año.

Antes de abordar la comparación conjunta entre parcelas, conviene destacar que cada formación vegetal muestra un comportamiento propio y coherente con su estructura y dinámica ecológica. El análisis individual de los índices en cada zona ha permitido identificar ritmos fenológicos, niveles de variabilidad interna y sensibilidad a factores como el relieve o la estacionalidad. Esta mirada detallada facilita ahora una visión más integrada y comparativa que ayudará a entender mejor las diferencias y similitudes entre las parcelas a lo largo del tiempo.

- Comparación conjunta de parcelas: NDVI

A continuación, se muestra un gráfico comparativo de líneas por parcela que nos permite evaluar diferencias fenológicas a nivel global.

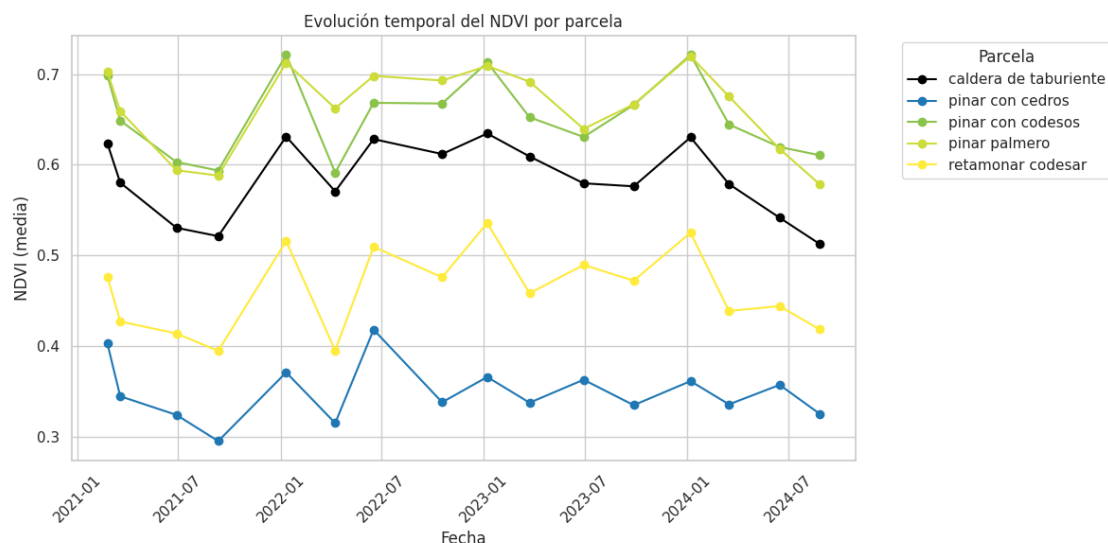


Figura 6.12. Evolución temporal del NDVI por formación vegetal.

El gráfico de evolución temporal del NDVI por parcela permite identificar las diferencias fenológicas entre las cinco zonas estudiadas. Los valores del índice reflejan el vigor vegetativo y, en conjunto, muestran una estacionalidad coherente con máximos relativos a inicios de año (invierno-primavera) y caídas hacia los meses de verano, aunque con variaciones según el tipo de vegetación.

El pinar palmero y el pinar con codesos de cumbre se sitúan en la parte alta del gráfico, con valores medios de NDVI entre 0.65 y 0.72. Esto indica una vegetación densa y activa durante casi todo el año, especialmente durante los inviernos húmedos, cuando alcanzan sus picos máximos de productividad. Son los ecosistemas más vigorosos del conjunto, por su capacidad de mantener humedad y cobertura vegetal en condiciones variables.

En contraste, el pinar con cedros se posiciona constantemente en la franja inferior del gráfico, con valores de NDVI mucho más bajos (entre 0.30 y 0.42), lo cual es coherente con su baja densidad de copa y la elevada presencia de suelo desnudo. No obstante, en los años finales de la serie el NDVI muestra una secuencia de picos relativamente regulares que no aparece en otros índices como SAVI, RENDVI o TCARI. Esto no implica necesariamente un cambio real en la vegetación, sino que se da por la propia naturaleza del NDVI, que es muy sensible a pequeñas variaciones en la reflectancia del suelo, la humedad de la superficie, la iluminación o la señal NIR en formaciones abiertas, como es este caso. Esto, puede generar oscilaciones periódicas como las que vemos en la Figura 6.12, que adoptan la forma de picos en la serie temporal. En cambio, índices como SAVI, que corrigen el efecto del suelo, no presentan estas fluctuaciones, mostrando un comportamiento más estable y representativo del estado real del pinar con cedros. Por ello, estos picos en el NDVI deben interpretarse como efectos derivados de la sensibilidad del índice y no necesariamente como cambios fenológicos. Precisamente por este tipo de comportamientos entre índices, es fundamental analizar varios indicadores de vegetación y no basar el análisis fenológico en un único índice.

La caldera de Taburiente, como zona de referencia más amplia y heterogénea, muestra una curva intermedia, reflejando una vegetación moderadamente densa con patrones de variación menos bruscos. Esto tiene sentido porque la Caldera funciona como una mezcla natural de diferentes tipos de vegetación y zonas con distintas orientaciones, lo que hace que sus valores sean intermedios y más estables.

Para el NDVI en la parcela de retamonar-codesar, aunque se detectan pequeñas oscilaciones entre estaciones, con ligeros picos o descensos en determinadas fechas, el comportamiento general del NDVI en esta parcela no muestra cambios abruptos. La actividad de la vegetación del retamonar-codesar parece mantenerse dentro de un margen relativamente estable, lo que concuerda con el carácter resiliente y poco exigente de estas formaciones arbustivas de alta montaña.

En resumen, este gráfico resume cómo cada tipo de formación vegetal responde a lo largo del tiempo, y justifica el uso del NDVI como índice principal para detectar diferencias fenológicas y estructurales en el conjunto del área de estudio.

- Comparativa estacional: NDVI por estación

Para finalizar con esta sección, se presenta el gráfico por estaciones que condensa toda la información anual. Es útil para detectar patrones consistentes de comportamiento entre invierno, primavera, verano y otoño, favoreciendo el análisis.

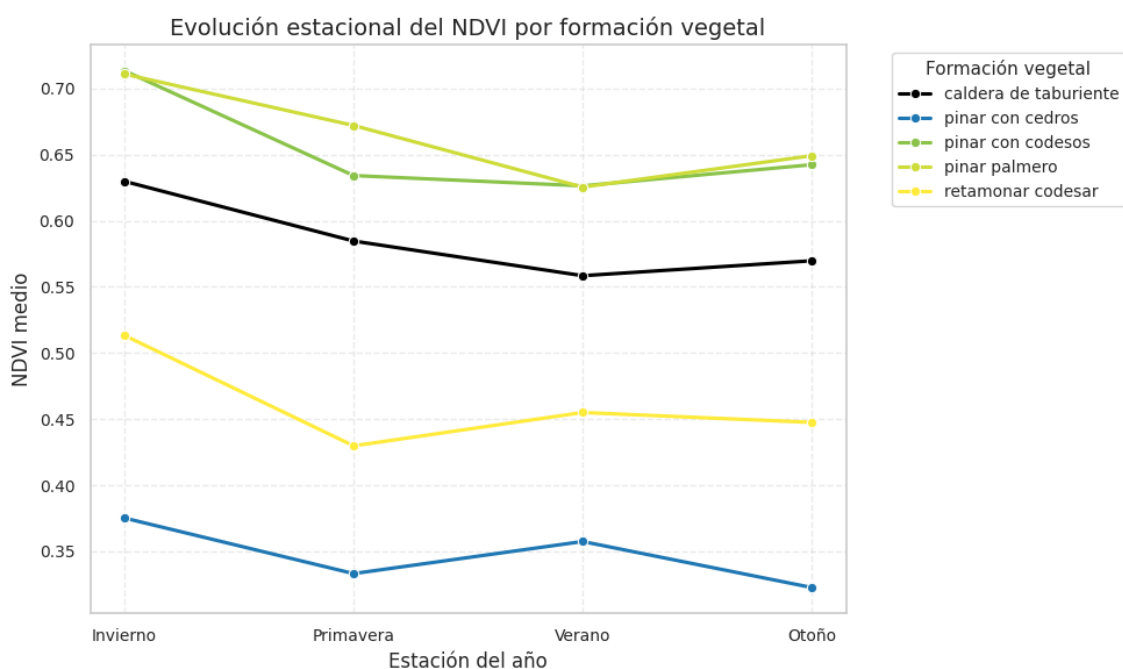


Figura 6.13. Evolución estacional del NDVI por formación vegetal.

El gráfico de evolución estacional del NDVI por formación vegetal proporciona una visión resumida del comportamiento medio de cada tipo de vegetación a lo largo del año. Esta representación permite identificar fácilmente los ciclos fenológicos

predominantes, ya que agrupa los valores de todas las parcelas en cuatro estaciones, facilitando así el análisis entre formaciones.

En invierno, se observan los valores más altos de NDVI en la mayoría de las parcelas, especialmente en el pinar palmero y el pinar con codesos, lo cual refleja una mayor actividad fotosintética asociada a la disponibilidad hídrica y a unas temperaturas suaves típicas de esta época en la Caldera. En cambio, durante el verano, la mayoría de las formaciones experimentan un descenso notable, asociado al estrés hídrico y a una menor productividad vegetal.

Por otro lado, el retamónar-codesar se mantiene a lo largo del año, con fluctuaciones. Este comportamiento puede estar relacionado con su estructura arbustiva y su mayor tolerancia a condiciones de estrés estacional. En contraste, el pinar palmero muestra mayor oscilación estacional, lo que podría deberse a su respuesta más dinámica a los cambios de humedad y temperatura.

Este enfoque estacional, por tanto, no solo resume de manera eficaz la información temporal acumulada, sino que permite también identificar de forma directa las diferencias funcionales entre los tipos de vegetación estudiados.

6.5.6 Comparativa entre formaciones vegetales mediante boxplots

Con el objetivo de comparar de forma sencilla y visual las diferencias entre las parcelas analizadas, se elaboraron diagramas de caja (boxplots) para los cuatro índices de vegetación empleados: NDVI, SAVI, TCARI y RENDVI. Este tipo de gráfico permite representar de forma compacta la distribución de los valores medios, destacando la mediana, los cuartiles (Q1 y Q3) y los valores extremos.

Gracias a estos gráficos, es posible observar qué formaciones presentan mayor vigor vegetal, cuáles son más estables o variables, y qué tipo de vegetación responde con mayor intensidad a los distintos índices.

A continuación, aparece un gráfico que resume la distribución de valores del índice NDVI para cada tipo de vegetación, permitiendo identificar qué formaciones mantienen mayor vigor fotosintético medio.

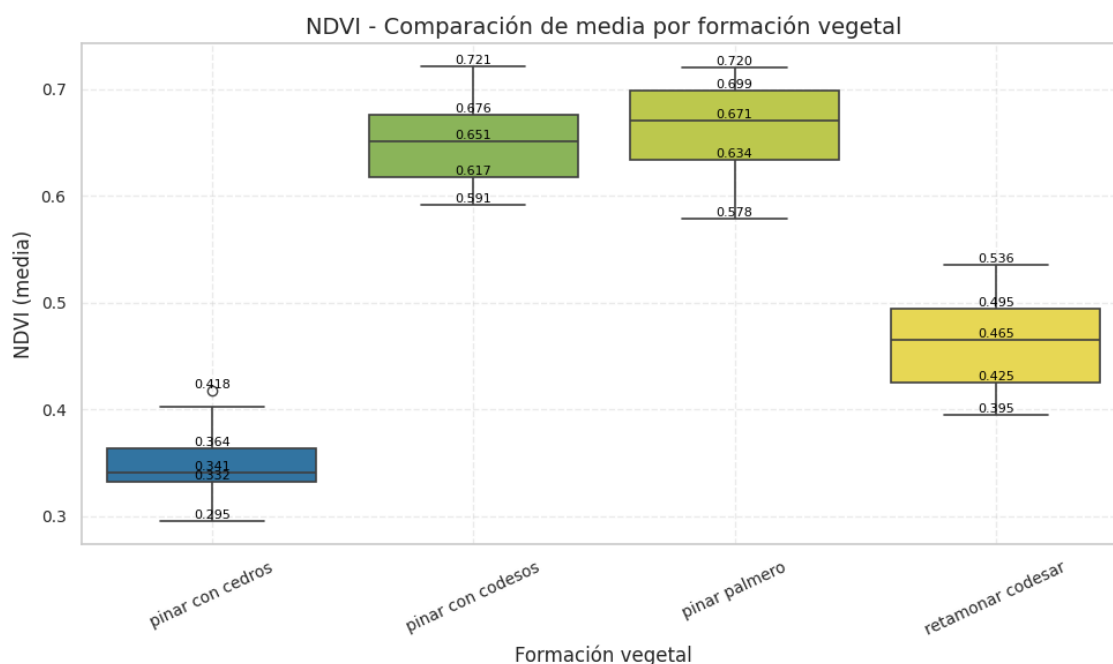


Figura 6.14. Comparación de valores medios de NDVI por formación vegetal.

La formación con mayores valores medianos de NDVI es el pinar palmero (~ 0.67), y el pinar con codesos (~ 0.65). Ambas presentan una caja compacta, lo que indica una distribución bastante homogénea y saludable en términos de cobertura y actividad vegetal. Por el contrario, el retamonar-codesar y el pinar con cedros reflejan los valores más bajos, especialmente este último, con una mediana inferior a 0.35. Esto puede explicarse por la menor densidad de cobertura.

Ahora, se muestra el uso del índice SAVI, que atenúa el efecto del suelo, se visualizan mejor las diferencias de cobertura vegetal entre formaciones más abiertas y densas.

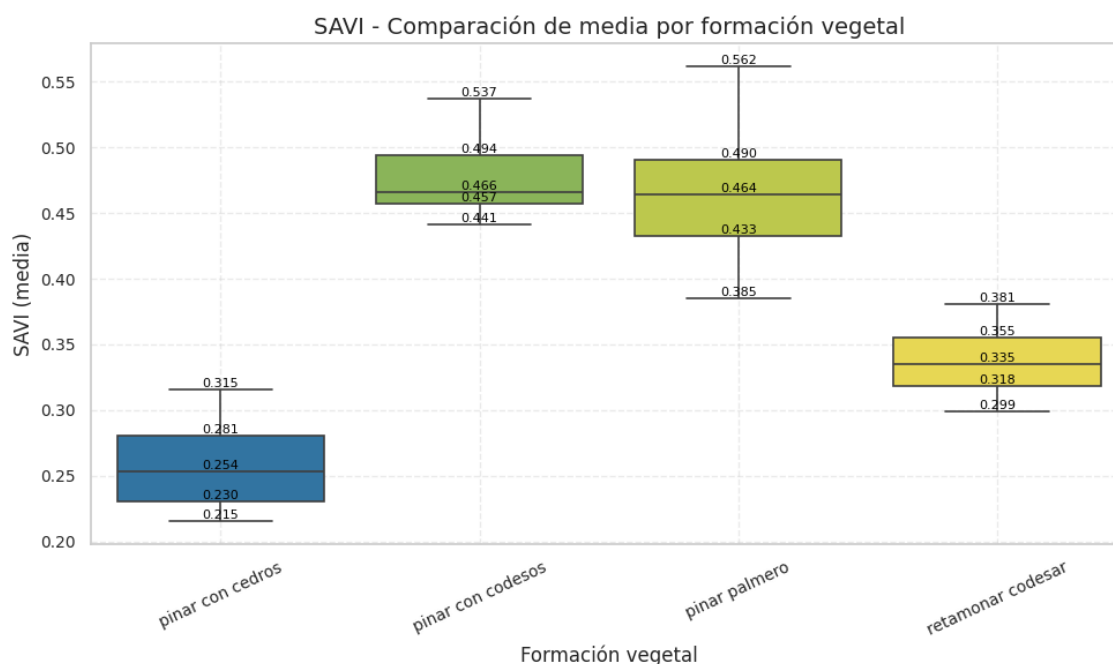


Figura 6.15. Comparación de valores medios de SAVI por formación vegetal.

Con el SAVI, que corrige en parte el efecto del suelo, las diferencias entre formaciones son más evidentes. El pinar palmero y el pinar con codesos mantienen las medianas más altas ($\sim 0.46 - 0.47$), lo que refuerza su condición de formaciones densas y activas. El retamonar-codesar muestra valores algo más bajos (~ 0.34), probablemente por su estructura arbustiva, más abierta y dispersa. El pinar con cedros desciende notablemente en este índice (~ 0.25), lo que sugiere una mayor influencia del fondo del suelo o una cobertura más discontinua.

Por otro lado, se presenta el boxplot del TCARI, relacionado con la clorofila, que muestra la dispersión y variabilidad interna en cada tipo de vegetación, reflejando posibles diferencias fisiológicas.

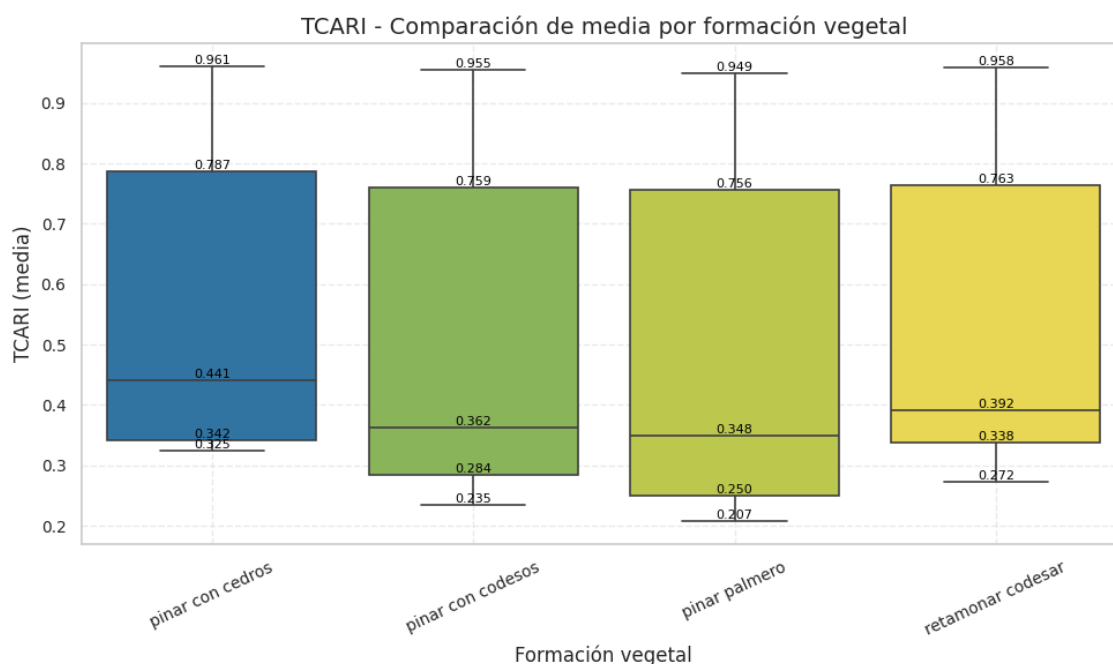


Figura 6.16. Comparación de valores medios de TCARI por formación vegetal.

El índice TCARI, sensible al contenido de clorofila, presenta una dispersión mucho mayor que el resto de los índices. Esto es especialmente evidente en el pinar con cedros, cuya caja abarca desde valores bajos (~ 0.34) hasta niveles altos (~ 0.78), reflejando una heterogeneidad interna muy elevada. Esta amplitud puede deberse a la presencia de zonas con estrés o menor cobertura combinadas con otras de mayor vigor. En el pinar palmero, la mediana es baja (~ 0.35), pero los valores máximos alcanzan casi 0.95, lo que apunta a contrastes dentro del área. Las formaciones de retamonar-codesar y pinar con codesos presentan cajas más compactas, aunque también con rangos amplios, lo que podría estar vinculado a diferencias locales en clorofila o exposición solar. En general, los boxplots del TCARI destacan por su amplitud, ya que este índice es más sensible a cambios puntuales en la clorofila y factores como sombra, ángulo solar o estrés hídrico puntual.

Por último, se muestra el gráfico del RENDVI, que aporta una visión intermedia entre NDVI y TCARI, indicando las diferencias en densidad y actividad fotosintética de las distintas parcelas.

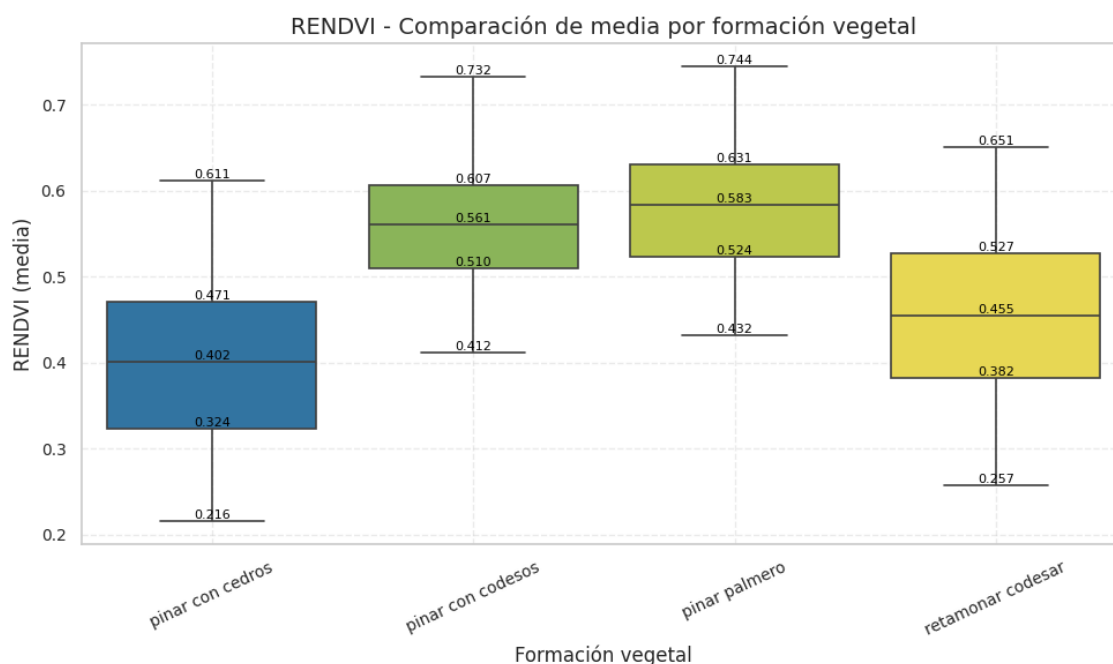


Figura 6.17. Comparación de valores medios de RENDVI por formación vegetal.

El RENDVI refleja una situación intermedia entre NDVI y TCARI. De nuevo, el pinar palmero y el pinar con codesos lideran con medianas por encima de 0.58 y cajas estrechas, dando consistencia en su vigor en la vegetación. El retamonar-codesar ocupa una posición intermedia (~ 0.45), mientras que el pinar con cedros se mantiene en los valores más bajos (~ 0.40). Este índice resulta útil para matizar las diferencias observadas con NDVI, ya que es menos sensible al ángulo solar y condiciones atmosféricas.

En resumen, se observa una coherencia clara entre los índices y los tipos de vegetación. El pinar palmero y el pinar con codesos presentan los valores más altos y consistentes, indicando una buena salud de la vegetación. El retamonar-codesar se mantiene en una posición media, como formación de arbustos densa pero menos activa. Por último, el pinar con cedros presenta los valores más bajos en todos los índices, lo que podría reflejar una combinación de factores como una menor densidad de vegetación, la pendiente del terreno o las características del suelo en esas zonas.

Esta comparativa ayuda a entender cómo responde cada tipo de vegetación y qué información aporta cada índice sobre su estado, estructura o actividad a lo largo del tiempo.

6.5.7 Enfoque específico: zona del incendio

Este subapartado se centra en el análisis de la parcela correspondiente a la zona afectada por el incendio de 2023, delimitada previamente mediante un shapefile específico. A diferencia de las otras zonas, esta unidad de análisis no responde a una formación vegetal, sino a un área incendiada de interés ecológico y fenológico, lo que justifica un tratamiento analítico aparte.

Durante el verano de 2023, la isla de La Palma sufrió un importante incendio forestal, que comenzó el 15 de julio en el municipio de Puntagorda, al norte de la isla, y que posteriormente se extendió hacia Tijarafe. Este evento tuvo un fuerte impacto en la zona occidental de la isla, afectando parcialmente al entorno del Parque Nacional de la Caldera de Taburiente.

Según datos del Cabildo de La Palma y el Gobierno de Canarias, el incendio afectó aproximadamente a 2.900 hectáreas, de las cuales alrededor de 300 hectáreas se encontraban dentro de los límites del Parque Nacional. El área quemada incluyó superficies de pinar canario y matorrales de retamar-codesar, dos de las principales formaciones vegetales analizadas en este trabajo [61], [62], [63].

Esta perturbación representó una oportunidad para estudiar la dinámica de recuperación ecológica post-incendio mediante herramientas de teledetección. Por ello, se incorporó una zona específica delimitada por shapefile en el análisis, centrando la atención en la evolución temporal del NDVI y en la comparación con otras zonas no afectadas.

A continuación, se presenta una figura donde se puede apreciar la extensión de este incendio.



Figura 6.18. Imagen publicada por el Cabildo de La Palma en twitter donde se observa la superficie afectada por el incendio forestal declarado en el término municipal de Puntagorda, actualizada a las 20.15 horas del 15 de julio de 2023. Se calcula que son unas 4.500 hectáreas.

- Metodología de análisis

Para evaluar el impacto del incendio forestal de julio de 2023 en la Caldera de Taburiente y analizar la posterior evolución de la vegetación, se estableció una zona de estudio específica, delimitada mediante un shapefile que recogía el perímetro exacto afectado por el fuego, como se ha mencionado anteriormente. Este shapefile fue aplicado sobre las imágenes satelitales preprocesadas, facilitando la extracción de estadísticas únicamente dentro del área quemada.

Con el objetivo de obtener una visión completa del proceso de degradación y recuperación de la vegetación, se seleccionaron fechas estratégicas durante dos años completos (2023 y 2024), incluyendo:

- Fechas previas al incendio: especialmente abril y junio de 2023, con valores NDVI que reflejan el estado de la vegetación en condiciones normales.
- Fecha inmediatamente posterior: septiembre de 2023, justo tras el incendio, cuando se espera el mayor descenso en cobertura vegetal.

- Fechas posteriores regulares: con una periodicidad trimestral hasta agosto de 2024, para observar la progresiva recuperación ecológica del área.

En cada una de estas fechas, se aplicó un análisis zonal del índice NDVI, extrayendo estadísticas descriptivas como la media, desviación estándar, valor mínimo y máximo, lo que permitió identificar fases clave de pérdida, estabilización y posible regeneración de la cubierta vegetal.

Además del análisis gráfico, se elaboraron mapas de diferencia espectral en QGIS para ilustrar espacialmente el grado de cambio tras el incendio. Para ello, se calcularon manualmente diferencias de NDVI entre la fecha inmediatamente anterior al incendio (junio de 2023) y tres momentos clave posteriores: septiembre de 2023, enero de 2024 y junio de 2024. Estos mapas visualizan, píxel a píxel, el descenso o recuperación del índice, destacando las zonas con mayor daño y aquellas que muestran signos tempranos de regeneración.

Esta combinación de análisis estadístico y representación espacial proporciona una imagen completa de la dinámica post-incendio.

Tabla 6.4. Evolución NDVI - Zona quemada.

Fecha	NDVI medio	Desviación estándar	NDVI mínimo	NDVI máximo
2023-01-07	0.608	0.163	0.101	1.000
2023-03-24	0.595	0.171	0.093	0.933
2023-06-29	0.592	0.135	0.121	0.902
2023-09-27	0.318	0.091	0.066	0.781
2024-01-07	0.368	0.123	0.046	0.926
2024-03-16	0.342	0.116	0.064	0.862
2024-06-15	0.383	0.100	0.131	0.836
2024-08-26	0.385	0.119	0.061	0.800

Tras el incendio, el NDVI medio descendió de 0.592 en junio de 2023 a 0.318 en septiembre de 2023, indicando una pérdida generalizada de cobertura vegetal. A partir de ese mínimo, el NDVI medio mostró un aumento gradual:

- Enero 2024: 0.368
- Marzo 2024: 0.342
- Junio 2024: 0.383
- Agosto 2024: 0.385

Esto corresponde a un incremento total de 0.067 puntos en 11 meses, equivalente a una tasa media de recuperación de NDVI de 0.0061 por mes:

$$\text{Tasa media de recuperación} = \frac{NDVI_{\text{agosto 2024}} - NDVI_{\text{septiembre 2023}}}{\text{meses transcurridos}} = \frac{0.385 - 0.318}{11} \approx 0.0061 \text{ NDVI/mes}$$

Suponiendo que esta tendencia se mantiene, el tiempo necesario para alcanzar los niveles previos al incendio (~0.59) se estima como:

$$t = \frac{NDVI_{\text{pre-incendio}} - NDVI_{\text{septiembre 2023}}}{\text{tasa media de recuperación}} = \frac{0.59 - 0.318}{0.0061} \approx 44 \text{ meses}$$

Esto indica que, si la tendencia lineal se mantiene, se estima que la zona podría alcanzar los niveles previos al incendio (~0.59) en aproximadamente 44 meses desde septiembre de 2023, es decir, hacia mayo de 2027.

A continuación, la Figura 6.19 muestra la evolución del NDVI medio en la zona incendiada.

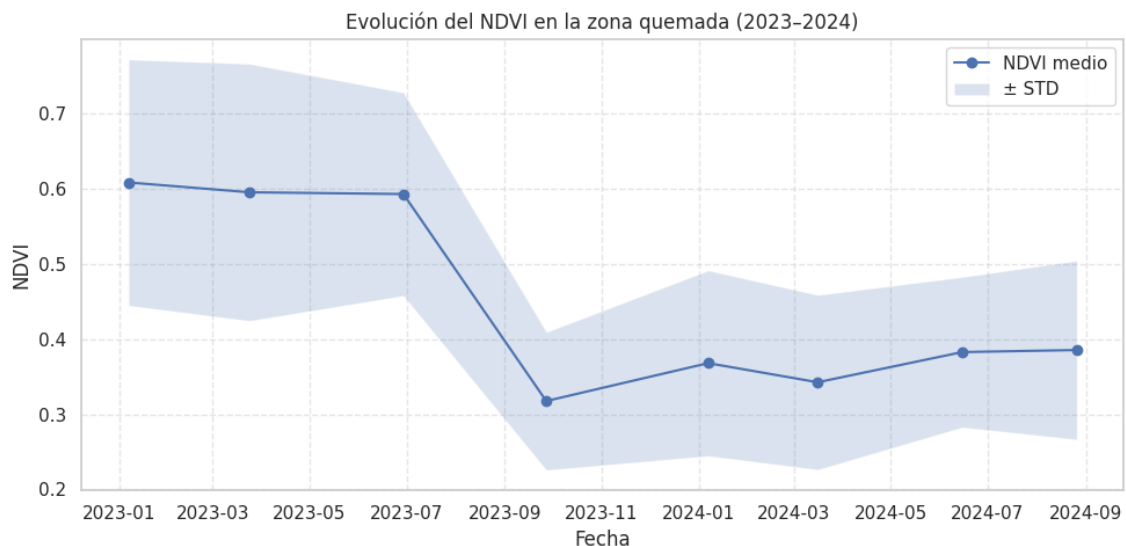


Figura 6.19. Evolución del NDVI medio en la zona incendiada.

Antes del incendio, los valores eran relativamente altos y estables (NDVI ~ 0.59 - 0.61), reflejando una cubierta vegetal activa y bien desarrollada. Sin embargo, tras el incendio

(septiembre de 2023), se produjo una caída drástica del NDVI hasta un valor medio de 0.31, con una desviación estándar de apenas 0.09, lo que indica una pérdida generalizada de cobertura y una homogeneización del paisaje afectado.

En los meses siguientes, se observa una lenta recuperación. Para enero de 2024, el NDVI medio había subido a 0.36, y continuó recuperándose ligeramente hasta alcanzar 0.38 en agosto de 2024. No obstante, estos valores siguen siendo sustancialmente más bajos que los previos al incendio, lo que sugiere que el ecosistema aún no ha recuperado completamente su funcionalidad fotosintética.

Además del análisis gráfico, se elaboraron mapas de diferencia espectral en QGIS para ilustrar el grado de cambio tras el incendio. La siguiente figura presenta tres mapas de diferencia del índice NDVI obtenidos con QGIS, que muestran la variación espectral entre la fecha previa al incendio (20 de junio de 2023) y tres momentos posteriores de 2024. Cada mapa refleja píxel a píxel la ganancia o pérdida relativa de vegetación en el área afectada por el fuego, permitiendo visualizar espacialmente la evolución del proceso de regeneración.

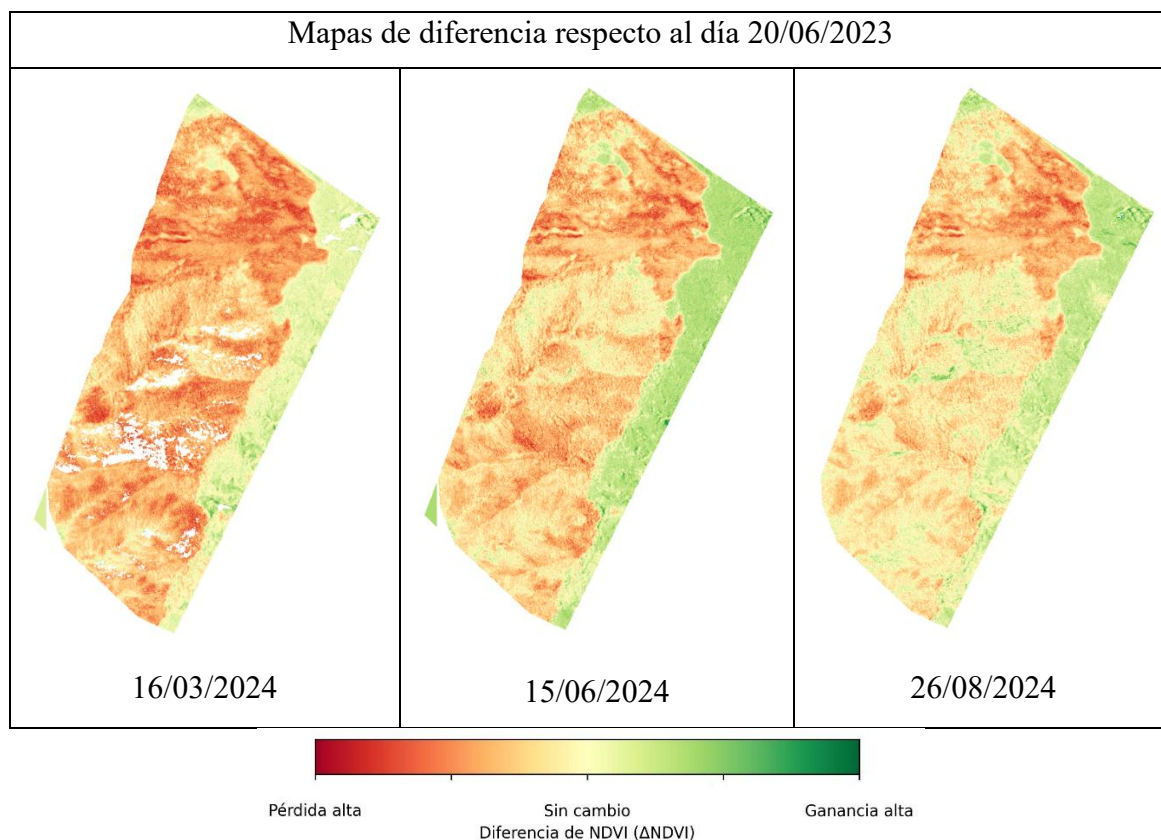


Figura 6.20. Mapas de diferencia de NDVI tras el incendio de julio de 2023.

- **Mapa del 16/03/2024.** Nueve meses después del incendio, los efectos negativos siguen siendo muy evidentes. El mapa muestra un dominio de tonalidades rojizas intensas en casi toda la superficie, lo que indica que la mayor parte de la vegetación sigue con valores de NDVI notablemente inferiores a los observados antes del incendio. Algunas zonas del sureste comienzan a mostrar áreas de tono anaranjado claro, donde podrían estar iniciándose procesos de rebrote.
- **Mapa del 15/06/2024.** Un año después del incendio, se observa una mejora generalizada en la respuesta espectral del NDVI. Aunque los tonos rojizos siguen presentes, su intensidad ha disminuido respecto al mapa anterior. Aparecen cada vez más zonas en verde suave, especialmente en los bordes del perímetro y en áreas de menor pendiente, indicando procesos de regeneración vegetal. Esta evolución es coherente con la dinámica de recuperación natural de especies típicas del pinar canario y la flora post-incendio.
- **Mapa del 26/08/2024.** Para finales del verano de 2024, la tendencia a la recuperación se consolida. El color rojo ha perdido intensidad y se generalizan zonas en tonos amarillentos o verdosos, que sugieren una cobertura vegetal parcialmente restablecida. Si bien no se alcanzan todavía los niveles previos al incendio, la mejora en la respuesta espectral es evidente, especialmente en sectores con menor severidad o mayor disponibilidad hídrica.

Cabe destacar que no se incluyó ninguna imagen satelital correspondiente a los meses posteriores al incendio durante el año 2023, ya que tras aplicar las correcciones radiométricas necesarias (mediante la máscara UDM), gran parte de la zona afectada presentaba sombras orográficas persistentes o nubes residuales. Esto generó un mapa ambiguo y poco fiable en términos espectrales, especialmente en bandas clave para el cálculo del NDVI. Dado que un análisis correcto del índice NDVI depende directamente de la calidad radiométrica y atmosférica de la imagen, se decidió excluir estas fechas para evitar interpretaciones erróneas.

El análisis temporal del NDVI en la zona quemada y los mapas de diferencia generados demuestran de forma clara el potencial de la teledetección para monitorizar eventos como los incendios forestales. La caída de los valores tras el incendio, seguida de una

lenta recuperación, evidencia el impacto directo sobre la cubierta vegetal y permite cuantificar el proceso de regeneración. Además, la comparación espacial mediante mapas diferencia facilita la localización de áreas más afectadas y aquellas con mayor capacidad de respuesta ecológica.

Este tipo de estudios resulta clave para la gestión de espacios naturales protegidos como la Caldera de Taburiente, ya que proporciona información rápida, detallada y repetible en el tiempo, sin necesidad de intervención directa sobre el terreno. En este contexto, los índices de vegetación derivados de imágenes satelitales no solo permiten documentar el daño, sino también guiar decisiones futuras en conservación, restauración o planificación forestal. Por tanto, la teledetección se consolida como una herramienta fundamental para afrontar retos ambientales en zonas de alto valor ecológico.

6.5.8 Interpretación final de resultados

Tras todo el análisis estadístico y visual llevado a cabo, es posible hacer una lectura general del comportamiento de las distintas formaciones vegetales del Parque Nacional de la Caldera de Taburiente a lo largo de los últimos años. Gracias al trabajo multitemporal, utilizando 16 fechas diferentes desde 2021 hasta 2024, se han podido detectar tanto los patrones normales de las estaciones como las respuestas ante eventos puntuales, como incendios o condiciones atmosféricas anómalas.

Una de las conclusiones más claras es que cada tipo de vegetación ha mostrado un comportamiento propio. El pinar palmero se ha comportado como la formación más activa y estable, con índices altos y pocas oscilaciones bruscas. El pinar con codesos ha tenido también valores elevados, aunque con más altibajos en algunos momentos del año. Por su parte, el retamonar - codesar ha mantenido un comportamiento más discreto pero regular, con valores medios y bastante estabilidad. En cambio, el pinar con cedros ha presentado más variabilidad, tanto entre fechas como dentro de la propia parcela, lo que puede estar relacionado con su estructura menos densa y la complejidad del terreno.

Si nos centramos en los índices de vegetación, también hay diferencias. El NDVI ha sido el más fácil de interpretar, marcando muy bien los picos de crecimiento en primavera y los descensos en verano. Sin embargo, también ha sido el más sensible a pequeñas interferencias, como ocurrió en junio de 2022, donde se detectó un pico inusual en el pinar con cedros que no aparecía en otros índices. El SAVI, al corregir mejor el efecto del suelo, ha sido más fiable en zonas con vegetación más abierta. El

RENDVI ha servido para ver bien las diferencias de vigor vegetal, y el TCARI, aunque más variable, ha permitido captar matices relacionados con la salud de la vegetación.

En general, NDVI y SAVI han sido los más consistentes y útiles para el análisis temporal, mientras que TCARI y RENDVI han aportado información más específica que ha ayudado a completar la interpretación.

Todo este trabajo no habría sido posible sin un enfoque multitemporal, es decir, utilizando muchas fechas distintas repartidas en el tiempo. Esto ha permitido ver cómo se comporta cada formación vegetal en las diferentes estaciones del año, y detectar con claridad patrones como el crecimiento en invierno o el estrés en verano. Además, se han podido identificar casos concretos como el descenso brusco del NDVI tras el incendio de 2023, seguido de una lenta recuperación.

Por último, gracias a los mapas generados en QGIS, ha sido posible ver con claridad las diferencias dentro de cada parcela y entre parcelas, lo que complementa los datos estadísticos. Esta combinación de análisis numérico y visual ha sido clave para sacar conclusiones.

En resumen, el análisis multitemporal y por parcelas ha permitido entender mucho mejor cómo se comporta la vegetación del parque a lo largo del tiempo, cuáles son las formaciones más activas, cuáles son más sensibles a los cambios y cómo responden ante eventos como un incendio. Todo esto muestra el potencial de la teledetección como herramienta para estudiar, monitorizar y cuidar los ecosistemas naturales.

Capítulo 7. Conclusiones.

En este capítulo se presentan las conclusiones derivadas del desarrollo del trabajo, integrando los resultados obtenidos a lo largo de las distintas fases de análisis. Se revisa el grado de cumplimiento de los objetivos planteados inicialmente, se interpretan los principales resultados del análisis fenológico basado en índices de vegetación y se evalúa la utilidad de los datos PlanetScope y de la metodología empleada para el estudio de la dinámica de la vegetación en el Parque Nacional de la Caldera de Taburiente. Finalmente, se plantean posibles líneas futuras de trabajo orientadas a la mejora y ampliación del análisis realizado.

7.1 Revisión de los objetivos planteados

Se han abordado con éxito todos los objetivos planteados. Este Trabajo de Fin de Grado ha permitido llevar a cabo un análisis fenológico multitemporal y multispectral de la vegetación del Parque Nacional de la Caldera de Taburiente, utilizando imágenes satelitales PlanetScope como fuente principal. A través de un flujo de trabajo completo, desde la corrección y normalización de las imágenes hasta la visualización e interpretación de los índices de vegetación, se han obtenido resultados que reflejan el comportamiento estacional de diferentes formaciones vegetales, así como el impacto y la recuperación tras un evento de incendio. La metodología empleada ha demostrado la utilidad de la teledetección como herramienta de observación y gestión ecológica, permitiendo detectar patrones que no serían evidentes mediante observación directa. En conjunto, este estudio no solo cumple los objetivos propuestos, sino que abre nuevas vías para seguir aplicando tecnologías geoespaciales en entornos naturales de alto valor ambiental.

7.1.1 Objetivo 1: Preprocesado de imágenes PlanetScope

El tratamiento inicial de las imágenes PlanetScope supuso una fase fundamental para garantizar la calidad del análisis posterior. Aunque estas imágenes ya venían corregidas geométricamente de origen (ortorrectificadas), esto se verificó mediante la superposición de imágenes consecutivas y capas de referencia. Esta revisión permitió confirmar que no existían desplazamientos significativos, y que todas las fechas podían integrarse en un análisis multitemporal sin necesidad de ajustes espaciales adicionales.

En cuanto al aspecto radiométrico, se llevó a cabo un filtrado de píxeles no válidos utilizando la máscara UDM2 proporcionada por la propia plataforma Planet. Esta máscara permitió excluir automáticamente zonas afectadas por nubes, sombras o errores de lectura. Además, se complementó este filtrado con criterios adicionales implementados en Python, como la eliminación de píxeles con valores anómalos en el canal NIR o excesivamente brillantes en el visible, garantizando así que solo se analizaran superficies libres de contaminación atmosférica.

Una vez verificada la validez y calidad de las imágenes, no fue necesario realizar el proceso de mosaico, ya que los productos PlanetScope utilizados ya abarcaban completamente el área de estudio del Parque Nacional de la Caldera de Taburiente.

Cada imagen descargada correspondía a una única imagen que cubría la zona de interés, lo que simplificó el flujo de trabajo.

7.1.2 Objetivo 2: Cálculo de índices de vegetación

Una vez preparadas las imágenes y aplicadas las correcciones necesarias, se inició el proceso de cálculo de índices de vegetación a partir de las bandas espectrales disponibles. En primer lugar, se realizó una normalización de las bandas, dividiendo los valores digitales originales por 10.000 para convertirlos en reflectancias en el rango [0, 1], tal y como recomienda Planet en su documentación técnica. Esta transformación es fundamental para asegurar la coherencia entre imágenes de distintas fechas, facilitando una comparación multitemporal fiable. A partir de estas bandas normalizadas, se automatizó el cálculo de 17 índices diferentes (BBG y NBG), cuyas fórmulas fueron implementadas y organizadas en cuadernos independientes (notebooks) según el tipo de información espectral utilizada.

Tras el cálculo, cada índice fue nuevamente normalizado mediante un escalado min-max para comprimir sus valores entre 0 y 1. Esta segunda normalización permitió estandarizar los resultados y facilitar tanto su visualización como su análisis estadístico comparativo posterior. Cada uno de los índices generados se exportó como archivo georreferenciado en formato GeoTIFF, lo que asegura su compatibilidad con sistemas de información geográfica como QGIS. Las salidas generadas incluían el nombre del índice y la fecha correspondiente, almacenándose de forma ordenada en Google Drive, facilitando su consulta y reutilización.

Como parte del proceso de control de calidad, se incluyó una visualización preliminar de todos los índices generados directamente desde el entorno Python. Se utilizaron mapas de calor (colormaps) para representar la variabilidad espacial de los índices dentro del parque nacional. Aunque estos mapas no fueron empleados en el análisis principal, sirvieron como herramienta de revisión visual para identificar posibles errores, o zonas con comportamientos inesperados antes de exportar los resultados finales. Esta representación inicial facilitó una primera interpretación rápida del comportamiento de la vegetación en cada fecha y ayudó a validar el correcto funcionamiento de los scripts desarrollados.

7.1.3 Objetivo 3: Análisis fenológico por parcelas

La delimitación de las zonas de estudio fue un paso fundamental para el análisis posterior. A través de shapefiles vectoriales, se seleccionaron cinco áreas representativas dentro del Parque Nacional de la Caldera de Taburiente: cuatro formaciones vegetales del parque (pinar con cedros, pinar con codesos de cumbre, pinar palmero y retamonar-codesar) y una zona adicional correspondiente al área afectada por el incendio de 2023. Estas fueron elegidas tanto por su relevancia ecológica como por su distribución espacial diversa, lo que permitió abordar un análisis más completo y representativo del comportamiento fenológico de la vegetación.

Una vez delimitadas las zonas, se aplicó un análisis multitemporal de los índices de vegetación seleccionados (NDVI, SAVI, TCARI y RENDVI) a lo largo de las 16 fechas de observación. Se extrajeron estadísticas zonales como la media, el mínimo, el máximo y la desviación estándar para cada parcela y cada fecha. Esto permitió generar gráficos evolutivos para cada formación, identificar picos de actividad vegetativa, periodos de estrés y comparar comportamientos estacionales entre tipos de vegetación. Además, se integraron gráficos de caja (boxplots) y representaciones por estación del año para profundizar en la variabilidad interna de cada parcela. Esta parte del análisis fue clave para detectar patrones fenológicos, diferencias estructurales entre formaciones y la sensibilidad específica de cada índice.

En cuanto a la zona del incendio, se implementó un enfoque específico centrado en evaluar el impacto y la recuperación de la vegetación tras el evento de agosto de 2023. Se extrajeron estadísticas NDVI para fechas previas y posteriores al incendio, lo que permitió trazar una curva de evolución de la cobertura vegetal afectada. Asimismo, se elaboraron mapas de diferencia de NDVI en QGIS, comparando la imagen anterior al incendio con distintas fechas posteriores. Estos mapas fueron fundamentales para visualizar espacialmente las zonas más afectadas y las áreas que comenzaron a mostrar signos de regeneración. En conjunto, este análisis demostró el potencial de la teledetección para monitorear dinámicas ecológicas complejas, como la recuperación post-incendio.

7.2 Conclusiones del análisis de resultados

7.2.1 Comportamiento por índice de vegetación

Durante el análisis se evaluaron cuatro índices de vegetación principales: NDVI, SAVI, TCARI y RENDVI. Cada uno aportó información diferente sobre el estado y evolución de la vegetación, permitiendo un análisis más completo y ajustado a las particularidades de cada formación vegetal.

- NDVI fue el índice más generalista, útil para detectar picos de actividad y estacionalidad. Reflejó bien los ciclos de crecimiento, aunque en algunas fechas aisladas pudo verse afectado por factores como niebla o humedad, debido a su alta sensibilidad al NIR.
- SAVI, al incorporar una corrección para el fondo del suelo, ofreció mejores resultados en zonas con vegetación más abierta o discontinua. Mostró valores consistentes y fue especialmente útil en parcelas como el retamonar o el pinar con cedros.
- TCARI se centró en el contenido de clorofila y mostró mayor variabilidad entre parcelas. Esto permitió detectar diferencias fisiológicas internas, aunque también lo hizo más sensible a sombras o condiciones irregulares, lo que se tradujo en una peor capacidad para discriminar claramente entre las distintas formaciones vegetales.
- RENDVI, basado en el rojo edge, destacó por su estabilidad y utilidad para diferenciar estructuras vegetales. Aportó una visión más matizada que el NDVI y fue especialmente útil en formaciones densas como el pinar palmero o con codesos.

En resumen, la combinación de estos índices permitió abordar el análisis desde distintas dimensiones, mejorando la interpretación de los patrones temporales y espaciales de la vegetación en el Parque Nacional.

7.2.2 Comparación entre formaciones vegetales

El análisis permitió distinguir claramente diferentes comportamientos vegetales según el tipo de formación, lo que valida la utilidad del enfoque por parcelas y multitemporal.

- **Parcelas más activas:** El pinar palmero y el pinar con codesos destacaron por mostrar valores altos y consistentes en todos los índices. Su densidad de vegetación y cobertura explican su alta productividad, especialmente en primavera e invierno.
- **Parcelas más estables:** El retamonar-codesar presentó una evolución más homogénea, con menor amplitud en los valores y una respuesta más moderada a los cambios estacionales. Esto es coherente con su estructura de arbustos, menos sensible a variaciones hídricas o térmicas.
- **Parcelas con más variabilidad:** El pinar con cedros fue la formación con mayor dispersión en varios índices, especialmente en el TCARI. Su mayor variabilidad podría deberse a la heterogeneidad interna, la exposición topográfica o el estado de conservación.

Esto refuerza la importancia de adaptar el análisis a las características propias de cada ecosistema.

7.2.3 Estudio del impacto del incendio

El incendio que tuvo lugar en julio de 2023 permitió aplicar un análisis multitemporal y evaluar de forma práctica el comportamiento de los índices de vegetación. La teledetección permitió seguir la evolución de la zona quemada durante más de un año, proporcionando información cuantitativa sobre su respuesta y procesos de regeneración.

El NDVI fue el índice de referencia para evaluar los efectos del incendio. La media NDVI descendió de 0.592 en junio de 2023 a 0.318 en septiembre de 2023, reflejando la pérdida generalizada de cobertura vegetal. Posteriormente, el NDVI medio mostró un aumento gradual: enero 2024 (0.368), marzo 2024 (0.342), junio 2024 (0.383) y agosto 2024 (0.385).

La diferencia total respecto al mínimo post-incendio es de 0.067 puntos en 11 meses, lo que corresponde a una tasa media de recuperación de NDVI de 0.0061 por mes, calculada como $(0.385 - 0.318)/11$. Suponiendo que esta tendencia lineal se mantiene, se estima que la zona podría alcanzar los niveles previos al incendio (~ 0.59) en aproximadamente 44 meses desde septiembre de 2023, es decir, hacia mayo de 2027.

Los mapas de diferencia elaborados en QGIS permitieron visualizar de manera precisa las zonas con mayor pérdida y las posibles áreas en regeneración. Al comparar NDVI

antes y después del incendio (junio - septiembre 2023 y otras fechas clave de 2024), se identificaron patrones espaciales de daño y recuperación, ahora respaldados con datos cuantitativos y proyecciones de recuperación.

7.3 Líneas futuras de trabajo

A partir del trabajo realizado, se identifican varias posibilidades de ampliación y mejora que podrían enriquecer el análisis fenológico de la vegetación en la Caldera de Taburiente y aportar aún más valor al uso de teledetección en entornos naturales.

7.3.1 Ampliación del análisis temporal

Una primera línea de desarrollo sería la ampliación del intervalo temporal, incorporando imágenes de años anteriores (previos a 2021) o extendiendo el análisis a fechas actuales o futuras. Esto facilitaría tener una visión más sólida del comportamiento de la vegetación, detectar anomalías climáticas o eventos puntuales, e identificar ciclos repetitivos más largos.

Con una serie más amplia de datos en el tiempo, sería posible aplicar técnicas de análisis de tendencias, como ajustes de regresión o análisis de cambios significativos, para observar la evolución de las formaciones vegetales. Esto permitiría responder a preguntas clave sobre la dirección del cambio en la salud del ecosistema, efectos del cambio climático o eficacia de medidas de conservación implementadas.

7.3.2 Mejora en la calidad y diversidad de datos

Otra línea de trabajo podría ser incorporar datos de otros sensores, como Sentinel-2, que ofrece imágenes gratuitas con una resolución espacial y espectral útil para seguimiento de vegetación [64]. Igualmente, el uso de drones posibilita obtener imágenes de muy alta resolución para validar los datos satelitales o analizar áreas concretas con mayor detalle. La combinación de distintas fuentes enriquecería los análisis y permitiría validar los resultados obtenidos con PlanetScope.

7.3.3 Automatización y análisis avanzado

A medida que crece el volumen de imágenes satelitales disponibles y aumenta la resolución temporal y espacial de los sensores, se hace cada vez más necesario avanzar hacia enfoques más automatizados e inteligentes para el análisis de datos. Este trabajo ha demostrado que es posible estructurar flujos de procesamiento eficientes, pero aún

existen muchas oportunidades de mejora que podrían implementarse en investigaciones futuras.

Una línea de desarrollo prometedora es la aplicación de técnicas de inteligencia artificial (IA) y aprendizaje automático (machine / deep learning) para identificar patrones complejos en las series temporales de índices de vegetación. Por ejemplo, se podrían entrenar modelos para predecir el comportamiento estacional de una determinada formación vegetal, detectar cambios abruptos o incluso anticipar el impacto de eventos extremos como incendios, sequías o plagas [65].

Bibliografía

En este capítulo se encuentran las referencias, enlaces y documentos consultados para la realización de este TFG.

B1. Referencias bibliográficas

- [1] «Resultado de imágenes de Google». Accedido: 18 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.google.com/imgres?imgurl=x-raw-image:///d8095ef2c08e3cc1d4e5437338515951a347b178e6c95c0a40ceebd2d8dc23f&tbnid=wTyOwPJcDi0eM&vet=1&imgrefurl=https://oa.upm.es/70938/1/TFG_INAKI_OTERO_ANTERO.pdf&docid=Dvv3fl7PeYXezM&w=1065&h=600&hl=es-ES&gl=ES&source=sh/x/im/m1/2&kgs=22b4b516fafedfa0&shem=abme,trie
- [2] «Libro - Fundamentos de Teledetección - Emilio Chuvieco | PDF». Accedido: 18 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/55587962/LIBRO-FUNDAMENTOS-DE-TELEDETECCION-EMILIO-CHUVIECO>
- [3] «1.1: Introducción - LibreTexts Español». Accedido: 18 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://espanol.libretexts.org/Geociencias/Geograf%C3%ADa_\(F%C3%ADsica\)/Teledetecci%C3%B3n_\(Knudby\)/01%3A_Cap%C3%ADtulos/1.01%3A_Introducci%C3%B3n](https://espanol.libretexts.org/Geociencias/Geograf%C3%ADa_(F%C3%ADsica)/Teledetecci%C3%B3n_(Knudby)/01%3A_Cap%C3%ADtulos/1.01%3A_Introducci%C3%B3n)
- [4] «ESA - Eduspace ES - Inicio - Firmas espectrales». Accedido: 18 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_ES/SEM6DYD3GXF_0.html
- [5] «Contents of 2 Interacción de los elementos de la superficie terrestre con la radiación». Accedido: 18 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.um.es/geograf/sigmur/temariohtml/node70_ct.html
- [6] «TELEDETECCIÓN: LA RADIACIÓN Y SU INTERACCIÓN CON LOS ELEMENTOS DE LA SUPERFICIE TERRESTRE». Accedido: 18 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://marceloyopez9.wixsite.com/unisig/single-post/2018/05/30/teledetecci%C3%B3n-la-radiaci%C3%B3n-y-su-interacci%C3%B3n-con-los-elementos-de-la-superficie-terrestre>
- [7] «Espectro electromagnético - Wikipedia, la enciclopedia libre». Accedido: 18 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Espectro_electromagn%C3%A9tico

- [8] «Cómo proteger materiales y obras sensibles a la luz | Iluminet revista de iluminación». Accedido: 18 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://iluminet.com/materiales-sensibles-luz-importante-protegerlos/>
- [9] «ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS GUIADAS». Accedido: 18 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://luisblogf.blogspot.com/2019/03/a-que-frecuencias-trabajan-los-de-la.html>
- [10] «Índices de vegetación y su interpretación: NDVI, GNDVI, MSAVI2, NDRE y NDWI - Auravant». Accedido: 18 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.auravant.com/blog/agricultura-de-precision/indices-de-vegetacion-y-como-interpretarlos/>
- [11] «Planet | Homepage». Accedido: 23 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.planet.com/>
- [12] «PlanetScope». Accedido: 23 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://developers.planet.com/docs/data/planetscope/>
- [13] «Dove-2 Spacecraft - Nanosats Database». Accedido: 2 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.nanosats.eu/sat/dove-2>
- [14] «SuperDove eight band relative spectral response function as provided by... | Download Scientific Diagram». Accedido: 23 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/SuperDove-eight-band-relative-spectral-response-function-as-provided-by-Planet_fig3_369999080
- [15] «Understanding PlanetScope Instruments». Accedido: 23 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://developers.planet.com/docs/apis/data/sensors/>
- [16] «PlanetScope - Earth Online». Accedido: 23 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://earth.esa.int/eogateway/missions/planetscope>
- [17] S. C. Ariza, S. Kanaan, I. Carles, y V. Royo, «Procesamiento de imágenes multispectrales para el análisis del estado de la vegetación», 2018.
- [18] «Términos esenciales de imágenes y ráster de Esri—ArcGIS Pro | Documentación». Accedido: 23 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/help/data/imagery/essential-imagery-and-raster-terms.htm>

- [19] «Tema 3».
- [20] «Corrección radiométrica de imágenes satélite - Gis&Beers». Accedido: 23 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://www.gisandbeers.com/correccion-radiometrica-imagenes-satelite/>
- [21] «Cómo corregir el bandeo de imágenes Landsat 7 - Gis&Beers». Accedido: 23 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://www.gisandbeers.com/corregir-bandeado-imagenes-landsat-7/>
- [22] «GEOBIA para corrección atmosférica en Landsat 8 - Gis&Beers». Accedido: 23 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://www.gisandbeers.com/geobia-correccion-atmosferica-landsat-8/>
- [23] V. Arévalo Espejo, J. González Jiménez, y G. A. Cestero, «CORRECCIÓN GEOMÉTRICA PARA LA COMPARACIÓN DE IMÁGENES DE SATÉLITE DE DISTINTA RESOLUCIÓN 1».
- [24] «Características generales de Flora y Vegetación - GEOGRAFÍA FÍSICA - (GEVIC) Gran Enciclopedia Virtual Islas Canarias». Accedido: 18 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.gevic.net/info/contenidos/mostrar_contenidos.php?idcat=22&idcap=96&idcon=541
- [25] «Una flora tan única como espectacular - Visit La Palma». Accedido: 18 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: https://visitlapalma.es/recursos_naturales/una-flora-tan-unica-como-espectacular/
- [26] «Infografía: Pisos de vegetación de La Palma | Recursos educativos digitales». Accedido: 18 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www3.gobiernodecanarias.org/medusa/ecoescuela/recursosdigitales/2016/02/13/infografia-pisos-de-vegetacion-de-la-palma/>
- [27] M. del Arco Aguilar, «Mapa de vegetación de Canarias», 2006.
- [28] «Cardonal-tabaibal. Ecosistemas de las Islas Canarias». Accedido: 18 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: https://floracanaria.com/ecosistemas/cardonal_tabaibal.html

- [29] «Especies Vegetales en Canarias - Termófilo». Accedido: 23 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://endemicascanarias.com/es/ecosistemas/bosque-termofilo>
- [30] «Bosque termófilo |». Accedido: 18 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://cienciaciudadanaicaro.com/bosque-termofilo/>
- [31] «Especies Vegetales en Canarias - Monteverde». Accedido: 23 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://endemicascanarias.com/es/ecosistemas/monteverde>
- [32] «LAURISILVA EN CANARIAS - Isla de La Palma». Accedido: 18 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://lapalmaisland.com/laurisilva-en-canarias/>
- [33] «Fayal-brezal. Ecosistemas de las Islas Canarias». Accedido: 23 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: https://floracanaria.com/ecosistemas/fayal_brezal.html
- [34] «Especies Vegetales en Canarias - Pinar». Accedido: 23 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://endemicascanarias.com/es/ecosistemas/pinar>
- [35] «Especies Vegetales en Canarias - Pinar». Accedido: 18 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://endemicascanarias.com/index.php/es/ecosistemas/pinar>
- [36] «Especies Vegetales en Canarias - Alta Montaña Canaria». Accedido: 23 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://endemicascanarias.com/es/ecosistemas/alta-montana-canaria>
- [37] «Cedro canario (*Juniperus cedrus* subsp. *cedrus*) - CanariWiki». Accedido: 18 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www3.gobiernodecanarias.org/medusa/wiki/index.php?title=Cedro_canario_%28Juniperus_cedrus_subsp._cedrus%29
- [38] «Caldera de Taburiente: Valores naturales». Accedido: 18 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/parques-nacionales-oapn/red-parques-nacionales/parques-nacionales/taburiente/valores-naturales.html>
- [39] «Caldera de Taburiente: Área de influencia socioeconómica». Accedido: 2 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en:

- <https://www.miteco.gob.es/es/parques-nacionales-oapn/red-parques-nacionales/parques-nacionales/taburiente/area-influencia.html>
- [40] «Flora». Accedido: 11 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.gobiernodecanarias.org/parquesnacionales/taburiente/es/infoespec/flora/>
- [41] «Flora». Accedido: 18 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.gobiernodecanarias.org/parquesnacionales/taburiente/es/infoespec/flora/>
- [42] «Acerca de los índices de vegetación». Accedido: 11 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/39195330_Acerca_de_los_indices_de_vegetacion
- [43] «NDVI, ¿qué es y para qué sirve?». Accedido: 11 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.cursosteledeteccion.com/ndvi-que-es-y-para-que-sirve/>
- [44] «Agricultura de precisión: Índice de vegetación (NDVI) y por qué las plantas son verdes. - PortalFruticola.com». Accedido: 15 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.portalfruticola.com/noticias/2018/06/26/agricultura-de-precision-indice-de-vegetacion-ndvi-y-por-que-las-plantas-son-verdes/>
- [45] «¿Qué es el Índice GNDVI? - Auravant». Accedido: 15 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.auravant.com/ayuda-es/imagenes-indices-y-capas/3636624-que-es-el-indice-gndvi/>
- [46] «Índices de Vegetación, Pedro Muñoz A | PDF». Accedido: 11 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/682261593/Indices-de-vegetacion-Pedro-Munoz-A>
- [47] «Los 6 Índices de Vegetación para completar el NDVI - MappingGIS». Accedido: 15 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://mappinggis.com/2020/07/los-6-indices-de-vegetacion-para-completar-el-ndvi/>

- [48] «Teledetección: Nociones y Aplicaciones».
- [49] Y. Tarazona, F. Benitez-Paez, J. Nowosad, F. Drenkhan, y M. E. Timaná, «scikit-ee: A Python package for Remote Sensing Data Analysis», *J Open Source Softw*, vol. 9, n.o 99, p. 6692, jul. 2024, doi: 10.21105/JOSS.06692.
- [50] «Qué es un script de Python y su rol en inteligencia». Accedido: 10 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://ack3.eu/es/que-es-un-script-de-python-su-rol-en-inteligencia/>
- [51] «GF0604 Procesamiento de datos geográficos 2023-I - 3 GDAL - biblioteca para lectura y escritura de datos geoespaciales con interfaz de línea de comandos». Accedido: 10 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://gf0604-procesamientodatosgeograficos.github.io/2023-i/03-gdal.html>
- [52] «La librería Matplotlib | Aprende con Alf». Accedido: 10 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://aprendeconalf.es/docencia/python/manual/matplotlib/>
- [53] «Visor de IDECanarias». Accedido: 22 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://visor.grafcan.es/>
- [54] «Flora». Accedido: 9 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.gobiernodecanarias.org/parquesnacionales/taburiente/es/infoespec/flora/>
- [55] N. Champion, «AUTOMATIC DETECTION OF CLOUDS AND SHADOWS USING HIGH RESOLUTION SATELLITE IMAGE TIME SERIES», doi: 10.5194/isprsarchives-XLI-B3-475-2016.
- [56] V. Zekoll, R. de los Reyes, y R. Richter, «A Newly Developed Algorithm for Cloud Shadow Detection—TIP Method», *Remote Sensing 2022, Vol. 14, Page 2922*, vol. 14, n.o 12, p. 2922, jun. 2022, doi: 10.3390/RS14122922.
- [57] V. J. H. Trees, P. Wang, P. Stammes, L. G. Tilstra, D. P. Donovan, y A. P. Siebesma, «DARCLOS: a cloud shadow detection algorithm for TROPOMI», *Atmos. Meas. Tech*, vol. 15, pp. 3121-3140, 2022, doi: 10.5194/amt-15-3121-2022.

- [58] «How is the Surface Reflectance Product Provided? – Welcome to Planet Support». Accedido: 11 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://support.planet.com/hc/en-us/articles/115013886368-How-is-the-Surface-Reflectance-Product-Provided>
- [59] E. Kurbanov *et al.*, «Remote Sensing of Forest Burnt Area, Burn Severity, and Post-Fire Recovery: A Review», *Remote Sens (Basel)*, vol. 14, n.o 19, p. 4714, oct. 2022, doi: 10.3390/RS14194714/S1.
- [60] «Noticias IDE Canarias | Infraestructura de Datos Espaciales de Canarias». Accedido: 13 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.idecanarias.es/>
- [61] «La restauración de las zonas afectadas en La Palma por el incendio del verano de 2023 se centra en recuperar la biodiversidad y combatir la erosión». Accedido: 15 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.eldiario.es/canariasahora/lapalmaahora/sociedad/restauracion-zonas-afectadas-palma-incendio-verano-2023-centra-recuperar-biodiversidad-combatir-erosion_1_11300971.html
- [62] «GSC | El incendio forestal declarado en La Palma obliga a desalojar a los vecinos del núcleo poblacional de Tijarafe». Accedido: 15 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.gsccanarias.com/gsc/el-incendio-forestal-declarado-en-la-palma-obliga-a-desalojar-a-los-vecinos-del-nucleo-poblacional-de-tijarafe/>
- [63] «La Palma en llamas - NASA Ciencia». Accedido: 15 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://ciencia.nasa.gov/ciencias-terrestres/la-palma-en-llamas/>
- [64] «ESA - SENTINEL 2». Accedido: 15 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Spain/SENTINEL_2
- [65] S. De Precisión En *et al.*, «Selvicultura de precisión en plantaciones de Pinus Radiata L. basada en inteligencia artificial y teledetección», 2024, Accedido: 15 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://helvia.uco.es/xmlui/handle/10396/26455>

Parte II. Pliego de Condiciones

C1. Pliego de condiciones

Este apartado detalla los recursos materiales, herramientas software e imágenes satelitales utilizadas en el desarrollo del presente Trabajo de Fin de Grado. La combinación de medios locales, recursos cloud y bibliografía técnica ha permitido llevar a cabo un análisis multitemporal de la vegetación en el Parque Nacional de la Caldera de Taburiente (La Palma), basado en técnicas de teledetección.

C1.1. Medios materiales

MM1. Ordenador personal

El procesamiento de datos, redacción del documento y parte del análisis se realizaron en un equipo informático de uso personal con las siguientes características:

- Nombre del dispositivo: LAPTOP-HUI9IJ8M
- Procesador: Intel® Core™ i5-1035G4 CPU @ 1.10GHz - 1.50GHz
- Memoria RAM instalada: 8 GB (7.78 GB utilizable)
- Sistema operativo: Windows 64 bits, arquitectura x64

Este dispositivo fue utilizado principalmente para la organización del proyecto, ejecución de tareas ligeras de análisis y redacción de la memoria.

MM2. Material bibliográfico y documentación técnica

Durante el desarrollo del trabajo se consultaron numerosas fuentes digitales y bibliografía especializada, tanto en formato físico como online. Estas incluyeron manuales, artículos científicos, publicaciones técnicas y materiales académicos relacionados con:

- Teledetección y sensores ópticos.
- Índices de vegetación.
- Fenología de ecosistemas forestales.
- Procesamiento digital de imágenes.

Estas fuentes fueron fundamentales para comprender la base teórica, seleccionar índices adecuados y diseñar una metodología sólida.

MM3. Software y herramientas de trabajo

Para el procesamiento, análisis y visualización de datos se emplearon herramientas de software de libre acceso y entornos colaborativos. En particular:

- Python 3.10 (ejecutado en Google Colab): lenguaje principal para el procesamiento de imágenes y automatización. Se emplearon librerías como:
 - GDAL y Rasterio para lectura y manipulación de archivos ráster.
 - NumPy para operaciones matriciales.
 - GeoPandas para trabajar con archivos vectoriales.
 - Matplotlib para visualización gráfica.
- QGIS 3.34: Sistema de Información Geográfica libre, utilizado para:
 - Recorte espacial por shapefile.
 - Visualización detallada de índices.
 - Cálculo manual de mapas de diferencia.
 - Composición de mapas para la memoria.
- Google Colaboratory (Colab): Entorno cloud usado para ejecutar scripts, automatizar cálculos, almacenar y visualizar resultados.
- Microsoft Office: Utilizado para la redacción de la memoria, tablas, referencias y estructura final del documento.

MM4. Imágenes multispectrales de satélite

El conjunto de datos empleados en el análisis está formado por imágenes satelitales PlanetScope, específicamente en su formato Surface Reflectance (SR). Las características principales de las imágenes son:

- Proveedor: Planet Labs
- Sensor: SuperDove
- Formato: AnalyticMS_SR (reflectancia de superficie)
- Resolución espacial: 3 metros por píxel
- Número de bandas: 8 (de azul costero a infrarrojo cercano)

Se seleccionaron 16 fechas entre 2021 y 2024, garantizando baja nubosidad y cobertura total del Parque Nacional. Todas las imágenes incluyeron máscaras de validez (UDM2), lo que permitió filtrar nubes y sombras automáticamente antes de los cálculos espectrales.

MM5. Conexión a Internet

La conexión estable a Internet fue indispensable para:

- Descarga de imágenes desde el portal de Planet.
- Acceso a Google Drive y Google Colab.
- Consulta bibliográfica.
- Sincronización de archivos y respaldo en la nube.

Fdo.: Estefanía Abigail Morales de la Hoz

Las Palmas de Gran Canaria

Parte III: Presupuesto

P1. Presupuesto completo

El presupuesto de este Trabajo de Fin de Grado se ha estructurado en distintas secciones para reflejar con claridad los costes asociados a su desarrollo. Se incluyen tanto recursos materiales como humanos y otros conceptos relacionados con el uso de herramientas digitales y almacenamiento. Las partidas consideradas son:

1. Recursos hardware
2. Recursos software
3. Imágenes satelitales y cartografía auxiliar
4. Recursos humanos
5. Amortización
6. Redacción del documento
7. Material fungible
8. Impuestos

P1.1 Recursos materiales

Los recursos materiales utilizados comprenden el equipo informático, el software necesario (en su mayoría de libre acceso), las imágenes satelitales PlanetScope, así como cartografía auxiliar de pago y servicios adicionales de almacenamiento en la nube. El conjunto ha sido clave para el procesamiento de datos, el análisis multitemporal y la elaboración del documento.

P1.2 Recursos hardware

Durante el desarrollo del TFG se ha utilizado un ordenador personal con las siguientes características:

- Ordenador portátil HP - Modelo LAPTOP-HUI9IJ8M
 - Procesador: Intel(R) Core (TM) i5-1035G4 @ 1.10GHz – 1.50GHz
 - RAM: 8 GB
 - Disco duro interno: SSD
 - Sistema operativo: Windows 10 (64 bits)
 -

Tabla P.1: Coste de recursos hardware.

Recurso	Coste estimado
Ordenador portátil HP	699,00 €

Amortización

Se calcula la amortización del equipo hardware según el método lineal:

Tabla P.2: Amortización del equipo informático

Recurso	Valor adquisición	Vida útil estimada	Amortización (1 año)
Ordenador portátil	699,00 €	5 años	139,80 €

P1.3 Recursos software

En este trabajo se ha hecho uso de herramientas principalmente gratuitas de software libre. Sin embargo, se considera el coste asociado a la suscripción mensual a Google Drive por almacenamiento adicional necesario para manejar las imágenes procesadas.

Tabla P.3: Coste de software

Software o servicio	Coste
Python (Google Colab + librerías)	0 €
QGIS	0 €
Microsoft Office (versión universitaria)	0 €
Google Drive (200 GB – 1,79 €/mes x 6 meses)	10,74 €
Total	10,74 €

P1.4 Imágenes satelitales y cartografía

- Imágenes PlanetScope utilizadas bajo suscripción institucional - sin coste directo.
- Cartografía auxiliar: se adquirió un shapefile de parcelas del Parque Nacional de la Caldera de Taburiente a través de GRAFCAN.

Tabla P.4: Coste de datos geoespaciales

Fuente de datos	Coste
Imágenes PlanetScope	0 €
Shapefile de vegetación GRAFCAN	40,00 €

P1.5 Recursos humanos

El TFG se ha desarrollado a lo largo de aproximadamente 4 meses de dedicación parcial, equivalente a media jornada. Para estimar su coste se toma como referencia una dedicación técnica universitaria (BOULPGC).

Tabla P.5: Estimación de coste humano

Categoría	Sueldo mensual	Tiempo (media jornada)	Total estimado
Técnico universitario	1.801,02 €	4 meses (media jornada)	3.602,04 €

P1.7 Redacción del documento

El coste de redacción del proyecto se estima con la fórmula:

$$CR = 0,07 \times P \times Cn, \text{ con } Cn = 1 \text{ para presupuestos } < 30.050 \text{ €}.$$

Total acumulado hasta el momento:

Hardware + Software + Datos + Humanos + Amortización =

$$699,00 \text{ €} + 10,74 \text{ €} + 40,00 \text{ €} + 3.602,04 \text{ €} + 139,80 \text{ €} = 4.491,58 \text{ €}$$

$$CR = 0,07 \times 4.491,58 \text{ €} \times 1 = 314,41 \text{ €}$$

P1.8 Material fungible

No se han utilizado materiales fungibles físicos ni se ha incurrido en costes de impresión. Este apartado se considera sin coste.

P1.9 Impuestos

Se aplica el 7% de IGIC sobre el subtotal.

Tabla P.6: Resumen del presupuesto total

Concepto	Coste (€)
Recursos software	10,74
Datos geoespaciales	40,00
Recursos humanos	3.602,04
Amortización recursos hardware	139,80
Redacción del documento	314,41
Subtotal	4.805,99 €
IGIC (7%)	336,42
TOTAL	4.394,48 €

El presupuesto total de este TFG asciende a 4.394,48 €.

Fdo.: Estefanía Abigail Morales de la Hoz

Las Palmas de Gran Canaria

Parte IV: ANEXOS

ANEXO I. Tabla de evaluación de imágenes.

Contiene la tabla en la que se evaluaron todas las imágenes disponibles para el estudio, con el fin de seleccionar las 16 fechas finales utilizadas en el análisis. Esta evaluación permitió descartar imágenes con problemas de calidad y garantizar la consistencia temporal de la serie.

Trabajo Fin de Grado

Fecha	Nubosidad	Orientación de las Nubes	Nitidez General [1-5]	Observaciones
2020				
22/03/2020	Media baja	NO, S - SE	2	Nubes
24/07/2020	-	-	1	Mosaico. Se notan cortes o uniones
19/08/2020	-	-	2	Gran cantidad de sombras
25/08/2020	-	-	2	Mosaico. Gran diferencia entre cortes
03/11/2020	Baja	SE	2	Nubes
06/11/2020	Media alta	O - N, SE	1	
21/11/2020	-	-	3	Destellos en el NE
2021				
18/02/2021	-	-	4	Nieve en el N
19/02/2021	-	-	4	Nieve en el N
24/02/2021	Muy baja	SO, SE	4	
28/02/2021	Media alta	O – NO, S	2	
16/03/2021	-	-	3	Destellos en el N (posible bruma)
17/03/2021	-	-	3	Destellos en el N (posible bruma)
19/03/2021	Alta	SE	4	Pequeñas nubes
01/04/2021	-	-	2	Destellos en el N (posible bruma)
18/04/2021	-	-	3	
19/04/2021	-	-	4	Mosaico. Gran diferencia entre cortes
20/04/2021	-	-	4	Destellos en el SE
19/05/2021	-	-	3	Bruma
10/06/2021	-	-	2	Calima
28/06/2021	-	-	5	
03/07/2021	-	-	3	Calidad baja (mosaico)
08/07/2021	-	-	2	Calima
11/07/2021	-	-	4	
15/07/2021	-	-	5	
16/07/2021	-	-	2	Mosaico. Gran diferencia entre cortes
17/07/2021	-	-	5	
25/07/2021	-	-	4	
25/07/2021	-	-	4	
26/07/2021	-	-	3	
06/08/2021	-	-	5	
10/08/2021	Media	S, NO	3	
12/08/2021	Muy baja	SO	3	Mosaico. Gran diferencia entre cortes
15/08/2021	-	-	3	Calima
16/08/2021	-	-	4	Calima
17/08/2021	-	-	3	Calima
18/08/2021	-	-	4	Ligera calima
22/08/2021	-	-	5	
29/08/2021	-	-	1	Mosaico. Gran diferencia entre cortes
30/08/2021	-	-	5	
31/08/2021	Alta	NE-S, NO	1	Gran cantidad de nubes
08/09/2021	-	-	4	Ligera calima
10/09/2021	-	-	4	
11/09/2021	-	-	5	
26/09/2021	Muy baja	SE	4	
02/10/2021	-	-	4	Ligera calima
03/10/2021	-	-	4	Destello en el SO
07/10/2021	-	-	4	Destello en el SO

Trabajo Fin de Grado

07/10/2021	-	-	4	Destello en el SO
08/10/2021	-	-	3	Destellos
09/10/2021	Muy baja	SE	4	Nubes casi fuera de plano
17/10/2021	Muy baja	S	3	Destellos
18/10/2021	-	-	2	Parcheada por mosaico
28/10/2021	Media	O, SE, SE	2	Nubes
01/11/2021	Muy alta	S, O	1	Humo
02/11/2021	-	-	3	Bruma
08/11/2021	Muy baja	SE	3	
19/11/2021	Media baja	E, O	3	
25/12/2021	-	-	3	Bruma
2022				
11/01/2022	Muy baja	SE	4	Presencia de sombras y nubes
11/01/2022	Muy baja	E	3	Presencia de más sombras y nubes
12/01/2022	-	-	2	Presencia de muchas sombras
13/01/2022	Muy baja	NO, E	2	Presencia de sombras y nubes
14/01/2022	-	-	3	Presencia de sombras
15/01/2022	-	-	3	Destellos y sombras
30/01/2022	Muy baja	SO	3	Nieve
04/02/2022	-	-	2	Mosaico. Gran diferencia entre cortes
08/02/2022	-	-	3	Nieve
11/02/2022	-	-	3	Sombras
26/03/2022	-	-	1	Mosaico. Gran diferencia entre cortes
07/04/2022	-	-	3	Nieve
09/04/2022	-	-	5	
10/04/2022	-	-	5	
15/04/2022	-	-	4	Presencia de sombras
28/04/2022	-	-	4	Presencia de sombras
28/04/2022	-	-	5	
30/04/2022	Muy baja	S	3	Nubes
06/05/2022	-	-	1	Mosaico. Gran diferencia entre cortes
06/05/2022	-	-	2	Mosaico. Gran diferencia entre cortes
07/05/2022	-	-	5	
09/05/2022	-	-	4	
14/05/2022	Muy baja	S	4	Nubes
09/06/2022	-	-	3	Destellos N
09/06/2022	-	-	3	Destellos N, SO
17/06/2022	-	-	4	Sombras
04/07/2022	-	-	1	No se logra ver
09/07/2022	-	-	4	Sombras
08/08/2022	-	-	3	Sombras
16/08/2022	Muy baja	S	2	
16/08/2022	Baja	S, O	1	
22/08/2022	-	-	2	Destellos al N
23/08/2022	-	-	1	Mosaico, gran diferencia entre cortes
25/08/2022	-	-	4	
26/08/2022	Muy baja	S	3	
02/10/2022	-	-	2	Destellos en zona central
05/10/2022	-	-	1	Mal capturada
18/10/2022	-	-	3	Sombras
19/10/2022	-	-	2	Destellos al S y N
27/10/2022	-	-	3	
28/10/2022	-	-	3	Destellos en SE

Trabajo Fin de Grado

07/11/2022	Muy baja	SE	3	Sombras
10/11/2022	Muy baja	SE	2	
10/11/2022	Muy baja	SE	3	
15/11/2022	-	-	4	Sombras zona centro
17/11/2022	-	-	4	Sombras zona centro
28/11/2022	-	-	3	Sombras zona centro
29/11/2022	-	-	4	Sombras zona centro
01/12/2022	Alta	S, O	2	
02/12/2022	Media baja	S, O	3	
11/12/2022	-	-	3	
12/12/2022	-	-	1	Calima
19/12/2022	-	-	3	
20/12/2022	-	-	1	Mosaico, zonas parcheadas
24/12/2022	-	-	3	
29/12/2022	Media alta	O	1	
31/12/2022	-	-	1	Mosaico, gran diferencia entre cortes y parcheado
2023				
01/01/2023	Media	NO, SE	1	
07/01/2023	Muy baja	S	4	
07/01/2023	Muy baja	S	4	
03/03/2023	Muy baja	S, SE	3	Sombras
05/03/2023	-	-	1	Mosaico, gran diferencia entre cortes y parcheado
13/03/2023	-	-	3	Mosaicos, zonas parcheadas
23/03/2023	-	-	4	
24/03/2023	-	-	3	Calima
25/03/2023	-	-	2	Mosaicos, zonas parcheadas
30/03/2023	-	-	3	
01/04/2023	-	-	2	Mosaicos, zonas parcheadas
25/04/2023	-	-	4	
30/04/2023	-	-	4	
02/05/2023	-	-	4	
10/05/2023	-	-	5	
11/05/2023	-	-	3	Mosaico
15/05/2023	Muy baja	S	5	
16/05/2023	Baja	S, O	4	
27/05/2023	Alta	N, S	2	
29/05/2023	Muy alta	Todo	1	
31/05/2023	Baja	O, E	3	Imagen nítida pero presencia de nubes
16/06/2023	-	-	3	
27/06/2023	-	-	3	Destellos al N
29/06/2023	Baja	N	2	
10/07/2023	-	-	3	Mosaico, diferencia entre cortes
21/07/2023	-	-	3	Mosaico, diferencia entre cortes, parcheado
27/07/2023	Muy baja	S	4	
30/07/2023	-	-	2	Mosaico, diferencia entre cortes, parcheado
01/08/2023	-	-	5	
03/08/2023	Muy baja	S	4	
12/08/2023	-	-	5	
13/08/2023	Muy baja	NO	2	
21/08/2023	-	-	4	Mosaico, diferencia entre cortes
15/09/2023	Muy alta	O, S	2	
15/09/2023	Muy alta	O, S	2	
27/09/2023	Muy baja	O, S	4	Sombras

Trabajo Fin de Grado

27/09/2023	Muy baja	O, S	4	Sombra
02/10/2023	-	-	1	Mosaico parcheado
03/10/2023	-	-	1	Mosaico, diferencia entre cortes, parcheado
05/10/2023	-	-	4	
05/10/2023	-	-	3	Mosaico, diferencia entre cortes, parcheado
06/10/2023	-	-	4	
07/10/2023	-	-	5	
08/10/2023	-	-	1	Mosaico, diferencia entre cortes, parcheado
10/10/2023	-	-	3	Borrosa
11/11/2023	-	-	4	Sombras
15/11/2023	-	-	3	Sombras
19/11/2023	-	-	3	Parches
23/11/2023	-	-	3	Parches
13/12/2023	-	-	2	Destello al O
29/12/2023	-	-	3	Sombras
2024				
06/01/2024	-	-	3	Destellos en S y N
07/01/2024	-	-	3	
11/01/2024	-	-	3	Sombras
26/01/2024	-	-	3	Destellos en S
27/01/2024	-	-	1	Destellos en todo el area
29/01/2024	-	-	3	Destellos en O
31/01/2024	-	-	4	
01/02/2024	-	-	3	Calima
13/02/2024	-	-	2	Destello en zona central
17/02/2024	-	-	4	
20/02/2024	-	-	1	Destello en NE
21/02/2024	-	-	5	
22/02/2024	-	-	4	
03/03/2024	Media	NO	3	
16/03/2024	-	-	5	
17/03/2024	-	-	3	Mosaico, diferencia entre cortes, parcheado
18/03/2024	-	-	2	Mosaico, diferencia entre cortes, parcheado
02/04/2024	Baja	SO	3	
04/04/2024	-	-	1	Mal capturada
05/04/2024	-	-	2	Destello por toda la imagen
08/04/2024	Muy baja	S	4	
11/04/2024	-	-	2	Destello SO
12/04/2024	-	-	2	Destello SO
13/04/2024	-	-	2	Destello SO
15/04/2024	-	-	5	
16/04/2024	-	-	5	
24/04/2024	Baja	O	3	
03/05/2024	-	-	3	Mosaico, diferencia entre cortes, parcheado
04/05/2024	-	-	5	
05/05/2024	-	-	3	Destellos en NE
07/05/2024	-	-	3	Mosaico, diferencia entre cortes, parcheado
01/06/2024	-	-	4	
02/06/2024	-	-	3	
15/06/2024	Muy baja	S	3	
21/06/2024	-	-	1	Mosaico, diferencia entre cortes, parcheado
09/07/2024	-	-	4	
13/07/2024	-	-	3	Calima

Trabajo Fin de Grado

16/07/2024	-	-	2	Destello en N
20/07/2024	-	-	1	Mosaico y diferencia entre cortes
04/08/2024	-	-	2	Destellos
09/08/2024	-	-	4	
15/08/2024	-	-	5	
18/08/2024	-	-	3	Mosaico y diferencia entre cortes
26/08/2024	-	-	3	Mosaico y diferencia entre cortes

ANEXO II. Correcciones radiométricas de las 16 imágenes.

Incluye las correcciones aplicadas a las 16 imágenes seleccionadas, centradas en la eliminación de nubes y sombras, asegurando la fiabilidad de los valores espectrales utilizados en los cálculos posteriores.

24/02/2021

Porcentaje de píxeles válidos: 63.05%

Banda	Mínimo	Máximo
B1	0,0001	0,3509
B2	0,0073	0,3608
B3	0,0002	0,3655
B4	0,0001	0,3613
B5	0,001	0,4347
B6	0,0001	0,3961
B7	0,0001	0,3984
B8	0,05	0,4603



(a)



(b)



(c)

29/03/2021

Porcentaje de píxeles válidos: 69.89%

Banda	Mínimo	Máximo
B1	0,0001	0,3116
B2	0,0023	0,3147
B3	0,0001	0,3438
B4	0,0001	0,3668
B5	0,0005	0,4082
B6	0,0027	0,4018
B7	0,0083	0,4193
B8	0,05	0,4588



(a)



(b)



(c)

26/06/2021

Porcentaje de píxeles válidos: 74.66%

Banda	Mínimo	Máximo
B1	0,0001	0,2814
B2	0,0081	0,3006
B3	0,3006	0,3542
B4	0,0026	0,3578
B5	0,0079	0,4387
B6	0,0035	0,4153
B7	0,014	0,4312
B8	0,05	0,494



(a)



(b)



(c)

11/09/2021

Porcentaje de píxeles válidos: 73.83%

Banda	Mínimo	Máximo
B1	0,0001	0,271
B2	0,0146	0,3063
B3	0,0082	0,3395
B4	0,0137	0,3491
B5	0,0147	0,4118
B6	0,0148	0,3787
B7	0,0159	0,3847
B8	0,05	0,4106



(a)



(b)



(c)

11/01/2022

Porcentaje de píxeles válidos: 48.97%

Banda	Mínimo	Máximo
B1	0,0001	0,3287
B2	0,0064	0,3687
B3	0,0009	0,3774
B4	0,0001	0,3718
B5	0,0014	0,3838
B6	0,0001	0,3802
B7	0,0001	0,3898
B8	0,05	0,5271

Máscara final (válido = blanco)



(a)

Nubes detectadas (rojo)



(b)

Sombras detectadas (azul)



(c)

09/04/2022

Porcentaje de píxeles válidos: 71.37%

Banda	Mínimo	Máximo
B1	0,0001	0,3162
B2	0,0001	0,3221
B3	0,0039	0,336
B4	0,0001	0,353
B5	0,0084	0,4102
B6	0,0001	0,3888
B7	0,0001	0,4054
B8	0,05	0,4375

Máscara final (válido = blanco)



(a)

Nubes detectadas (rojo)



(b)

Sombras detectadas (azul)



(c)

07/06/2022

Porcentaje de píxeles válidos: 73.92%

Banda	Mínimo	Máximo
B1	0,0001	0,3148
B2	0,0154	0,3112
B3	0,0002	0,3178
B4	0,0155	0,3509
B5	0,0014	0,362
B6	0,0087	0,3751
B7	0,0185	0,4071
B8	0,05	0,5148

Máscara final (válido = blanco)



(a)

Nubes detectadas (rojo)



(b)

Sombras detectadas (azul)



(c)

18/10/2022

Porcentaje de píxeles válidos: 67.40%

Banda	Mínimo	Máximo
B1	0,0001	0,323
B2	0,011	0,3262
B3	0,0001	0,3348
B4	0,0049	0,3588
B5	0,0001	0,3859
B6	0,0047	0,4017
B7	0,0057	0,4163
B8	0,05	0,4068

Máscara final (válido = blanco)



(a)

Nubes detectadas (rojo)



(b)

Sombras detectadas (azul)



(c)

07/01/2023

Porcentaje de píxeles válidos: 53.64%

Banda	Mínimo	Máximo
B1	0,0001	0,3524
B2	0,0048	0,3599
B3	0,0007	0,36
B4	0,0001	0,3565
B5	0,0017	0,4099
B6	0,0001	0,4084
B7	0,0038	0,416
B8	0,05	0,4514



(a)



(b)



(c)

24/03/2023

Porcentaje de píxeles válidos: 72.19%

Banda	Mínimo	Máximo
B1	0,0001	0,3087
B2	0,0001	0,3146
B3	0,0083	0,3199
B4	0,0013	0,3292
B5	0,0148	0,3644
B6	0,0028	0,3508
B7	0,0072	0,3536
B8	0,05	0,4164



(a)



(b)



(c)

29/06/2023

Porcentaje de píxeles válidos: 75.04%

Banda	Mínimo	Máximo
B1	0,0001	0,2855
B2	0,0124	0,2998
B3	0,0023	0,3223
B4	0,0108	0,362
B5	0,0006	0,3968
B6	0,0201	0,3754
B7	0,0207	0,4101
B8	0,05	0,4876



(a)



(b)



(c)

27/09/2023

Porcentaje de píxeles válidos: 64.99%

Banda	Mínimo	Máximo
B1	0,0001	0,3192
B2	0,0232	0,3233
B3	0,0001	0,3201
B4	0,0148	0,3408
B5	0,0001	0,3736
B6	0,0156	0,3817
B7	0,0121	0,3993
B8	0,05	0,4626



(a)



(b)



(c)

07/01/2024

Porcentaje de píxeles válidos: 55.65%

Banda	Mínimo	Máximo
B1	0,0001	0,3261
B2	0,0112	0,3426
B3	0,0001	0,3387
B4	0,0009	0,3467
B5	0,0004	0,3576
B6	0,0016	0,3631
B7	0,0001	0,3688
B8	0,05	0,4003



(a)



(b)



(c)

16/03/2024

Porcentaje de píxeles válidos: 70.33%

Banda	Mínimo	Máximo
B1	0,0001	0,3139
B2	0,0064	0,3228
B3	0,0024	0,3316
B4	0,0043	0,3573
B5	0,0019	0,3908
B6	0,0082	0,3869
B7	0,0064	0,4143
B8	0,05	0,4185



(a)



(b)



(c)

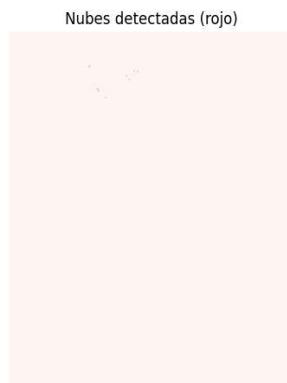
15/06/2024

Porcentaje de píxeles válidos: 73.72%

Banda	Mínimo	Máximo
B1	0,0001	0,3061
B2	0,0105	0,2998
B3	0,0001	0,3238
B4	0,0047	0,3569
B5	0,0011	0,4394
B6	0,0053	0,3892
B7	0,008	0,5522
B8	0,05	0,5628



(a)



(b)



(c)

26/08/2024

Porcentaje de píxeles válidos: 74.65%

Banda	Mínimo	Máximo
B1	0,0012	0,3207
B2	0,0001	0,2998
B3	0,0179	0,5068
B4	0,0005	0,6957
B5	0,0232	0,5537
B6	0,0066	0,3936
B7	0,0109	0,4945
B8	0,05	0,5535



(a)



(b)



(c)

ANEXO III. Estadísticas extraídas

Presenta las estadísticas extraídas de las 16 fechas seleccionadas, incluyendo media, desviación estándar, mínimo y máximo de los índices y bandas relevantes, facilitando un análisis cuantitativo de la vegetación.

fecha	parcela	media	std	mín	máx	Índice
24/02/2021	caldera de taburiente	0,623504043	0,16931897	0,200011581	0,99989599	NDVI
24/02/2021	caldera de taburiente	0,607515275	0,06935711	0,191139981	0,999564052	RENDVI
24/02/2021	caldera de taburiente	0,505693614	0,06202469	0,100058123	0,996257782	REPI
24/02/2021	caldera de taburiente	0,43995899	0,11406582	0,100014463	0,998401344	SAVI
24/02/2021	caldera de taburiente	0,923181236	0,0167174	0,122861169	0,997659504	TCARI
24/02/2021	pinar con cedros	0,402785122	0,10537731	0,200012326	0,956014872	NDVI
24/02/2021	pinar con cedros	0,533959329	0,03116797	0,349766552	0,862927735	RENDVI
24/02/2021	pinar con cedros	0,529970884	0,05991368	0,10463316	0,996257782	REPI
24/02/2021	pinar con cedros	0,31365037	0,074335	0,10002546	0,857781291	SAVI
24/02/2021	pinar con cedros	0,934784055	0,00972124	0,178232506	0,994030714	TCARI
24/02/2021	pinar con codesos	0,698471427	0,10581844	0,203368858	0,999729693	NDVI
24/02/2021	pinar con codesos	0,62852633	0,05195222	0,331590563	0,999564052	RENDVI
24/02/2021	pinar con codesos	0,51232636	0,0576702	0,274393916	0,743522406	REPI
24/02/2021	pinar con codesos	0,504600286	0,08873177	0,122242033	0,778448582	SAVI
24/02/2021	pinar con codesos	0,922229409	0,0171126	0,199791253	0,969379842	TCARI
24/02/2021	pinar palmero	0,702603281	0,13367669	0,200031206	0,99989599	NDVI
24/02/2021	pinar palmero	0,639498353	0,06327227	0,241633967	0,999247551	RENDVI
24/02/2021	pinar palmero	0,501245618	0,06191081	0,107017532	0,771963775	REPI
24/02/2021	pinar palmero	0,481675982	0,09951171	0,130368128	0,964683115	SAVI
24/02/2021	pinar palmero	0,919730783	0,01733307	0,264852554	0,965330541	TCARI
24/02/2021	retamonar codesar	0,476696432	0,10946446	0,200011581	0,949370682	NDVI
24/02/2021	retamonar codesar	0,550959468	0,03547511	0,342995137	0,827540636	RENDVI
24/02/2021	retamonar codesar	0,499722153	0,05312591	0,100058123	0,813238025	REPI
24/02/2021	retamonar codesar	0,354677916	0,08335451	0,100014463	0,694194078	SAVI
24/02/2021	retamonar codesar	0,927842677	0,00633304	0,475105286	0,993109584	TCARI
19/03/2021	caldera de taburiente	0,580292106	0,17445605	0,200010821	0,996345222	NDVI
19/03/2021	caldera de taburiente	0,371017575	0,13509293	0,100013152	0,960913599	RENDVI
19/03/2021	caldera de taburiente	0,363921076	0,07218433	0,10046313	0,994265437	REPI
19/03/2021	caldera de taburiente	0,413698137	0,12422868	0,1000164	0,993510842	SAVI
19/03/2021	caldera de taburiente	0,654897511	0,03285151	0,146502346	0,996058166	TCARI
19/03/2021	pinar con cedros	0,344646215	0,09888662	0,200010821	0,935229778	NDVI
19/03/2021	pinar con cedros	0,215665251	0,05813651	0,100013152	0,733254313	RENDVI
19/03/2021	pinar con cedros	0,387379616	0,07537585	0,131118342	0,994265437	REPI
19/03/2021	pinar con cedros	0,265285999	0,07749394	0,100452438	0,870790482	SAVI
19/03/2021	pinar con cedros	0,697038174	0,03325114	0,544449031	0,996058166	TCARI
19/03/2021	pinar con codesos	0,648757637	0,11583945	0,200482979	0,943578303	NDVI
19/03/2021	pinar con codesos	0,412493825	0,10020722	0,100532494	0,83161515	RENDVI
19/03/2021	pinar con codesos	0,380755603	0,06327531	0,135042161	0,639011085	REPI
19/03/2021	pinar con codesos	0,484160185	0,0983679	0,143818647	0,769189954	SAVI
19/03/2021	pinar con codesos	0,654091477	0,02006187	0,548183441	0,834795058	TCARI
19/03/2021	pinar palmero	0,659137368	0,13792799	0,200010821	0,98160702	NDVI
19/03/2021	pinar palmero	0,43236953	0,11999567	0,100087434	0,953151882	RENDVI
19/03/2021	pinar palmero	0,356963277	0,07375093	0,113979168	0,698233545	REPI
19/03/2021	pinar palmero	0,457717538	0,10765449	0,100331977	0,992618799	SAVI
19/03/2021	pinar palmero	0,641516089	0,02613189	0,155332699	0,869293332	TCARI
19/03/2021	retamonar codesar	0,42716071	0,10591984	0,200010821	0,827431798	NDVI
19/03/2021	retamonar codesar	0,257362247	0,06259105	0,100532494	0,602385938	RENDVI
19/03/2021	retamonar codesar	0,363386571	0,05114399	0,14081955	0,710941315	REPI
19/03/2021	retamonar codesar	0,320880532	0,08179844	0,1000164	0,679598153	SAVI

19/03/2021	retamonar codesar	0,67218256	0,0255113	0,559298396	0,884642363	TCARI
28/06/2021	caldera de taburiente	0,53048563	0,16212653	0,200010553	0,994028687	NDVI
28/06/2021	caldera de taburiente	0,381600767	0,13340373	0,100039512	0,974571168	RENDVI
28/06/2021	caldera de taburiente	0,488347322	0,05236802	0,104225181	0,986486375	REPI
28/06/2021	caldera de taburiente	0,362889737	0,10873584	0,100118443	0,998725474	SAVI
28/06/2021	caldera de taburiente	0,270999074	0,07078823	0,100062139	0,984835804	TCARI
28/06/2021	pinar con cedros	0,324073762	0,09296009	0,200010553	0,945518494	NDVI
28/06/2021	pinar con cedros	0,235109553	0,05818003	0,100072846	0,826654375	RENDVI
28/06/2021	pinar con cedros	0,476952344	0,06152171	0,168475226	0,986486375	REPI
28/06/2021	pinar con cedros	0,224389941	0,05723318	0,100200668	0,805523396	SAVI
28/06/2021	pinar con cedros	0,338735431	0,0760253	0,101605535	0,920185387	TCARI
28/06/2021	pinar con codesos	0,603057623	0,12844679	0,200287029	0,934518218	NDVI
28/06/2021	pinar con codesos	0,427642375	0,10751517	0,120608218	0,834733546	RENDVI
28/06/2021	pinar con codesos	0,521406412	0,03814439	0,292646438	0,767552972	REPI
28/06/2021	pinar con codesos	0,448345542	0,09441234	0,102198817	0,881525517	SAVI
28/06/2021	pinar con codesos	0,270463377	0,04895357	0,113040067	0,697803557	TCARI
28/06/2021	pinar palmero	0,593934953	0,13766937	0,200012878	0,975277066	NDVI
28/06/2021	pinar palmero	0,436928183	0,12259559	0,100115716	0,965387404	RENDVI
28/06/2021	pinar palmero	0,475758314	0,04782859	0,272277534	0,753571868	REPI
28/06/2021	pinar palmero	0,387734383	0,09397312	0,10049241	0,890827477	SAVI
28/06/2021	pinar palmero	0,238414541	0,05045729	0,100062139	0,688538969	TCARI
28/06/2021	retamonar codesar	0,413852632	0,10835302	0,200010553	0,856730878	NDVI
28/06/2021	retamonar codesar	0,283961385	0,06576692	0,103218488	0,680636525	RENDVI
28/06/2021	retamonar codesar	0,525091171	0,04047402	0,313748717	0,775769293	REPI
28/06/2021	retamonar codesar	0,329295576	0,09206098	0,100787327	0,766669452	SAVI
28/06/2021	retamonar codesar	0,338777572	0,06050457	0,137593716	0,829141557	TCARI
11/09/2021	caldera de taburiente	0,521249592	0,15449853	0,200011402	0,998665035	NDVI
11/09/2021	caldera de taburiente	0,431103468	0,13110313	0,100126445	0,986424148	RENDVI
11/09/2021	caldera de taburiente	0,449576706	0,07416257	0,102312066	0,981669724	REPI
11/09/2021	caldera de taburiente	0,385486662	0,12506568	0,100011051	0,997947991	SAVI
11/09/2021	caldera de taburiente	0,294499248	0,07631717	0,100410365	0,996025026	TCARI
11/09/2021	pinar con cedros	0,295240998	0,06960385	0,200011402	0,846364379	NDVI
11/09/2021	pinar con cedros	0,266277641	0,05082511	0,10319104	0,771786451	RENDVI
11/09/2021	pinar con cedros	0,436454266	0,07436602	0,173150688	0,981669724	REPI
11/09/2021	pinar con cedros	0,223803639	0,0571011	0,100053661	0,756776631	SAVI
11/09/2021	pinar con cedros	0,377803802	0,07748441	0,129133135	0,954386711	TCARI
11/09/2021	pinar con codesos	0,593672693	0,11065342	0,200135946	0,934546351	NDVI
11/09/2021	pinar con codesos	0,467778325	0,09184588	0,137006417	0,84620887	RENDVI
11/09/2021	pinar con codesos	0,478056341	0,06064568	0,223673776	0,772026837	REPI
11/09/2021	pinar con codesos	0,469816476	0,09957438	0,116166539	0,979819417	SAVI
11/09/2021	pinar con codesos	0,300978214	0,05187504	0,118142977	0,696347654	TCARI
11/09/2021	pinar palmero	0,58811146	0,12212473	0,200011551	0,978841782	NDVI
11/09/2021	pinar palmero	0,494464427	0,11054282	0,104076311	0,939530969	RENDVI
11/09/2021	pinar palmero	0,444556147	0,0793182	0,164680436	0,723937571	REPI
11/09/2021	pinar palmero	0,423076838	0,11365372	0,10056565	0,925621092	SAVI
11/09/2021	pinar palmero	0,25793466	0,05676179	0,100410365	0,766148627	TCARI
11/09/2021	retamonar codesar	0,394756317	0,09943357	0,200014368	0,815477252	NDVI
11/09/2021	retamonar codesar	0,319249332	0,06039687	0,105486259	0,724950552	RENDVI
11/09/2021	retamonar codesar	0,470809609	0,05556288	0,178895473	0,729798079	REPI
11/09/2021	retamonar codesar	0,327639788	0,09275115	0,100709483	0,77202642	SAVI

11/09/2021	retamonar codesar	0,361069381	0,05603541	0,154906124	0,802323937	TCARI
11/01/2022	caldera de taburiente	0,631101131	0,17229745	0,200011283	0,999596059	NDVI
11/01/2022	caldera de taburiente	0,633074403	0,07673515	0,14679125	0,999282539	RENDVI
11/01/2022	caldera de taburiente	0,473165572	0,08068869	0,101995006	0,992450297	REPI
11/01/2022	caldera de taburiente	0,488868296	0,14583817	0,100046821	0,995351732	SAVI
11/01/2022	caldera de taburiente	0,757261038	0,02334526	0,100852408	0,998897016	TCARI
11/01/2022	pinar con cedros	0,370947719	0,09853521	0,200011283	0,904294848	NDVI
11/01/2022	pinar con cedros	0,538835049	0,02959668	0,372266501	0,841145575	RENDVI
11/01/2022	pinar con cedros	0,483679116	0,06876789	0,115045361	0,992450297	REPI
11/01/2022	pinar con cedros	0,315435916	0,0731025	0,104956582	0,785732985	SAVI
11/01/2022	pinar con cedros	0,787174106	0,02429118	0,653283179	0,998897016	TCARI
11/01/2022	pinar con codesos	0,721247196	0,10430428	0,201885656	0,999263585	NDVI
11/01/2022	pinar con codesos	0,66739583	0,05955013	0,247727841	0,998702884	RENDVI
11/01/2022	pinar con codesos	0,451723009	0,06912114	0,273767501	0,864422739	REPI
11/01/2022	pinar con codesos	0,536982179	0,10111485	0,144618586	0,842267334	SAVI
11/01/2022	pinar con codesos	0,754343629	0,01609262	0,198596194	0,880534172	TCARI
11/01/2022	pinar palmero	0,712592483	0,13260181	0,200079069	0,999596059	NDVI
11/01/2022	pinar palmero	0,669939697	0,06898057	0,14679125	0,999282539	RENDVI
11/01/2022	pinar palmero	0,492151439	0,08517139	0,264491737	0,829918921	REPI
11/01/2022	pinar palmero	0,561662495	0,12940131	0,109416194	0,995351732	SAVI
11/01/2022	pinar palmero	0,750820577	0,02087858	0,100852408	0,941540301	TCARI
11/01/2022	retamonar codesar	0,515917003	0,11438704	0,200025946	0,972202003	NDVI
11/01/2022	retamonar codesar	0,578557014	0,03932847	0,391063929	0,957776606	RENDVI
11/01/2022	retamonar codesar	0,421444118	0,04825986	0,122947372	0,722841203	REPI
11/01/2022	retamonar codesar	0,36207062	0,06967115	0,108871154	0,703202188	SAVI
11/01/2022	retamonar codesar	0,757656455	0,01710581	0,629336834	0,912056386	TCARI
09/04/2022	caldera de taburiente	0,570685446	0,18035816	0,200010523	0,999788761	NDVI
09/04/2022	caldera de taburiente	0,60440892	0,06776717	0,302341491	0,999655068	RENDVI
09/04/2022	caldera de taburiente	0,372064114	0,0691565	0,101642862	0,996784806	REPI
09/04/2022	caldera de taburiente	0,411059886	0,14073306	0,100011453	0,999446988	SAVI
09/04/2022	caldera de taburiente	0,952765703	0,02986389	0,142975941	0,999678075	TCARI
09/04/2022	pinar con cedros	0,315057069	0,09665544	0,200010523	0,907068908	NDVI
09/04/2022	pinar con cedros	0,526651502	0,02414932	0,420363963	0,826811373	RENDVI
09/04/2022	pinar con cedros	0,393074602	0,0695048	0,181200907	0,996784806	REPI
09/04/2022	pinar con cedros	0,233080879	0,0750253	0,100011453	0,909315169	SAVI
09/04/2022	pinar con cedros	0,960503101	0,00725004	0,335693002	0,994627059	TCARI
09/04/2022	pinar con codesos	0,591336787	0,11822052	0,200061098	0,971867621	NDVI
09/04/2022	pinar con codesos	0,607020378	0,04434771	0,431200892	0,929295719	RENDVI
09/04/2022	pinar con codesos	0,387760788	0,05183906	0,176471636	0,675352573	REPI
09/04/2022	pinar con codesos	0,443693876	0,09644441	0,1138428	0,748794377	SAVI
09/04/2022	pinar con codesos	0,955158949	0,0145827	0,208865061	0,981383979	TCARI
09/04/2022	pinar palmero	0,662247539	0,13939968	0,200010523	0,999605119	NDVI
09/04/2022	pinar palmero	0,640278518	0,06081758	0,302341491	0,999655068	RENDVI
09/04/2022	pinar palmero	0,36731708	0,07501473	0,101642862	0,775074542	REPI
09/04/2022	pinar palmero	0,474113792	0,12478087	0,100117102	0,933203876	SAVI
09/04/2022	pinar palmero	0,949133694	0,03834855	0,156149015	0,980318189	TCARI
09/04/2022	retamonar codesar	0,395176917	0,10038979	0,200010523	0,758907199	NDVI
09/04/2022	retamonar codesar	0,544647336	0,0249688	0,433687031	0,675845623	RENDVI
09/04/2022	retamonar codesar	0,376408249	0,04606212	0,150972992	0,701766551	REPI
09/04/2022	retamonar codesar	0,298986942	0,07839902	0,100012802	0,67083472	SAVI

09/04/2022	retamonar codesar	0,958106697	0,00349142	0,521413028	0,987534285	TCARI
17/06/2022	caldera de taburiente	0,628277183	0,15433544	0,200012729	0,999635994	NDVI
17/06/2022	caldera de taburiente	0,478485852	0,14996167	0,100094855	0,999554873	RENDVI
17/06/2022	caldera de taburiente	0,361565351	0,09159301	0,100010268	0,987967789	REPI
17/06/2022	caldera de taburiente	0,423945159	0,11250089	0,1001046	0,997928917	SAVI
17/06/2022	caldera de taburiente	0,278311521	0,07157148	0,100050233	0,974495649	TCARI
17/06/2022	pinar con cedros	0,418110549	0,10906967	0,200012729	0,956105053	NDVI
17/06/2022	pinar con cedros	0,297745049	0,07964217	0,100094855	0,863454521	RENDVI
17/06/2022	pinar con cedros	0,323949188	0,09891622	0,100010268	0,987967789	REPI
17/06/2022	pinar con cedros	0,273969322	0,06026782	0,10047365	0,84292239	SAVI
17/06/2022	pinar con cedros	0,342577338	0,08723741	0,111152843	0,974495649	TCARI
17/06/2022	pinar con codesos	0,66834712	0,11316336	0,213111877	0,920010746	NDVI
17/06/2022	pinar con codesos	0,500189722	0,11221238	0,105200984	0,903702736	RENDVI
17/06/2022	pinar con codesos	0,378635347	0,06935404	0,100012369	0,696158886	REPI
17/06/2022	pinar con codesos	0,472321302	0,08469884	0,155411348	0,806321919	SAVI
17/06/2022	pinar con codesos	0,288328409	0,04815181	0,129454032	0,732683778	TCARI
17/06/2022	pinar palmero	0,69802624	0,11908592	0,200119495	0,973453522	NDVI
17/06/2022	pinar palmero	0,551337898	0,12967825	0,109427959	0,942402959	RENDVI
17/06/2022	pinar palmero	0,362330794	0,09997461	0,100010276	0,741654694	REPI
17/06/2022	pinar palmero	0,459511369	0,10369726	0,152371377	0,903397143	SAVI
17/06/2022	pinar palmero	0,250234663	0,05512667	0,100547627	0,684871852	TCARI
17/06/2022	retamonar codesar	0,509478331	0,10916261	0,200090617	0,857305169	NDVI
17/06/2022	retamonar codesar	0,356151968	0,07691476	0,106374651	0,716492712	RENDVI
17/06/2022	retamonar codesar	0,387702435	0,05816918	0,100033164	0,737149954	REPI
17/06/2022	retamonar codesar	0,38088131	0,08476572	0,120215215	0,77349323	SAVI
17/06/2022	retamonar codesar	0,335816175	0,06062976	0,102710381	0,869817376	TCARI
18/10/2022	caldera de taburiente	0,611840069	0,1802844	0,20001027	0,999152124	NDVI
18/10/2022	caldera de taburiente	0,513838828	0,14210406	0,100215405	0,991143942	RENDVI
18/10/2022	caldera de taburiente	0,151349887	0,02647786	0,100010134	0,896419168	REPI
18/10/2022	caldera de taburiente	0,457012475	0,14274387	0,100378737	0,999574244	SAVI
18/10/2022	caldera de taburiente	0,326642215	0,06285945	0,116313979	0,994357824	TCARI
18/10/2022	pinar con cedros	0,338028848	0,09587671	0,200011268	0,901692748	NDVI
18/10/2022	pinar con cedros	0,332502931	0,05189824	0,100820437	0,786700189	RENDVI
18/10/2022	pinar con cedros	0,148034737	0,02186618	0,100010216	0,362224489	REPI
18/10/2022	pinar con cedros	0,278860092	0,0731527	0,100436561	0,86433816	SAVI
18/10/2022	pinar con cedros	0,411748737	0,06141932	0,215158597	0,954265833	TCARI
18/10/2022	pinar con codesos	0,667589188	0,10767754	0,200764582	0,920972347	NDVI
18/10/2022	pinar con codesos	0,5364694	0,09045949	0,147713676	0,87666899	RENDVI
18/10/2022	pinar con codesos	0,147575885	0,02225194	0,100010827	0,26949954	REPI
18/10/2022	pinar con codesos	0,498185217	0,10170332	0,130361423	0,8972224	SAVI
18/10/2022	pinar con codesos	0,32326597	0,0398845	0,20028019	0,688084185	TCARI
18/10/2022	pinar palmero	0,692919552	0,1400855	0,200015604	0,9929142	NDVI
18/10/2022	pinar palmero	0,582748353	0,12204944	0,101821035	0,991143942	RENDVI
18/10/2022	pinar palmero	0,159365192	0,02751632	0,100010216	0,641284168	REPI
18/10/2022	pinar palmero	0,515502155	0,13034008	0,10133145	0,972594321	SAVI
18/10/2022	pinar palmero	0,306556374	0,0546276	0,167498246	0,7841236	TCARI
18/10/2022	retamonar codesar	0,475903273	0,12033945	0,20001027	0,867971778	NDVI
18/10/2022	retamonar codesar	0,396409482	0,06885054	0,113426954	0,783062398	RENDVI
18/10/2022	retamonar codesar	0,13202177	0,01599236	0,100010134	0,245175511	REPI
18/10/2022	retamonar codesar	0,356441617	0,08758849	0,101312794	0,860938609	SAVI

18/10/2022	retamonar codesar	0,345349699	0,04631307	0,183484584	0,749647319	TCARI
07/01/2023	caldera de taburiente	0,634516537	0,17318226	0,20001024	0,999730289	NDVI
07/01/2023	caldera de taburiente	0,532108009	0,09582079	0,112232193	0,998597145	RENDVI
07/01/2023	caldera de taburiente	0,465160787	0,08564122	0,123340212	0,988940001	REPI
07/01/2023	caldera de taburiente	0,480971545	0,15914972	0,10001909	0,988217711	SAVI
07/01/2023	caldera de taburiente	0,777841151	0,02248672	0,118485399	0,996703148	TCARI
07/01/2023	pinar con cedros	0,365936339	0,10534246	0,20001024	0,903125405	NDVI
07/01/2023	pinar con cedros	0,410254747	0,0402851	0,11709971	0,799095452	RENDVI
07/01/2023	pinar con cedros	0,47287935	0,06876793	0,155370638	0,988940001	REPI
07/01/2023	pinar con cedros	0,292712092	0,08719683	0,10044995	0,871443033	SAVI
07/01/2023	pinar con cedros	0,809262574	0,02203993	0,56538415	0,981014669	TCARI
07/01/2023	pinar con codesos	0,712851286	0,10553511	0,200419098	0,999650836	NDVI
07/01/2023	pinar con codesos	0,566257894	0,0718227	0,131719619	0,997292399	RENDVI
07/01/2023	pinar con codesos	0,447327673	0,07640669	0,264019877	0,706238031	REPI
07/01/2023	pinar con codesos	0,520077527	0,1098893	0,10315679	0,861360967	SAVI
07/01/2023	pinar con codesos	0,774738669	0,0161641	0,158090308	0,891993821	TCARI
07/01/2023	pinar palmero	0,708938777	0,13545112	0,20001407	0,999152005	NDVI
07/01/2023	pinar palmero	0,57506007	0,08476447	0,124884024	0,996447146	RENDVI
07/01/2023	pinar palmero	0,486548245	0,08914998	0,22468619	0,836242676	REPI
07/01/2023	pinar palmero	0,554645479	0,14255559	0,100172378	0,988217711	SAVI
07/01/2023	pinar palmero	0,770956099	0,01918463	0,197201416	0,916472554	TCARI
07/01/2023	retamonar codesar	0,535708606	0,12060715	0,200020343	0,972911537	NDVI
07/01/2023	retamonar codesar	0,467772335	0,05342573	0,112232193	0,916696429	RENDVI
07/01/2023	retamonar codesar	0,402725935	0,04885028	0,178653404	0,736834943	REPI
07/01/2023	retamonar codesar	0,351933986	0,0799365	0,10144484	0,79601872	SAVI
07/01/2023	retamonar codesar	0,778596699	0,01538674	0,613418281	0,929798305	TCARI
24/03/2023	caldera de taburiente	0,609164834	0,17764476	0,200010613	0,992594421	NDVI
24/03/2023	caldera de taburiente	0,532976985	0,10904349	0,105996005	0,979124904	RENDVI
24/03/2023	caldera de taburiente	0,32780537	0,08701508	0,100010328	0,99979192	REPI
24/03/2023	caldera de taburiente	0,412910819	0,14351207	0,100010417	0,991743386	SAVI
24/03/2023	caldera de taburiente	0,529911339	0,04930368	0,17169778	0,987007678	TCARI
24/03/2023	pinar con cedros	0,337549746	0,10077592	0,200010613	0,90538466	NDVI
24/03/2023	pinar con cedros	0,393399954	0,04608058	0,108279973	0,764936864	RENDVI
24/03/2023	pinar con cedros	0,346518606	0,08400334	0,100095302	0,99979192	REPI
24/03/2023	pinar con cedros	0,232130542	0,07682476	0,100010417	0,808545291	SAVI
24/03/2023	pinar con cedros	0,593623459	0,05114641	0,298018187	0,987007678	TCARI
24/03/2023	pinar con codesos	0,65237397	0,11634757	0,200074539	0,982268512	NDVI
24/03/2023	pinar con codesos	0,556212544	0,08032063	0,271624148	0,979124904	RENDVI
24/03/2023	pinar con codesos	0,339269161	0,06919684	0,100558691	0,652211189	REPI
24/03/2023	pinar con codesos	0,444666862	0,09749192	0,111731656	0,729152083	SAVI
24/03/2023	pinar con codesos	0,532320261	0,03227704	0,17169778	0,818340778	TCARI
24/03/2023	pinar palmero	0,691694319	0,13343655	0,200018287	0,983859837	NDVI
24/03/2023	pinar palmero	0,584076166	0,09337138	0,105996005	0,964696944	RENDVI
24/03/2023	pinar palmero	0,327723473	0,09585579	0,100010328	0,705155909	REPI
24/03/2023	pinar palmero	0,469139695	0,13042676	0,100151293	0,986155868	SAVI
24/03/2023	pinar palmero	0,510970831	0,0396041	0,279689491	0,92515552	TCARI
24/03/2023	retamonar codesar	0,458273709	0,117596	0,200013861	0,819571674	NDVI
24/03/2023	retamonar codesar	0,442915827	0,05711545	0,132852718	0,710455656	RENDVI
24/03/2023	retamonar codesar	0,313925683	0,05831368	0,100555465	0,706776381	REPI
24/03/2023	retamonar codesar	0,307484537	0,08310121	0,100015521	0,72058171	SAVI

24/03/2023	retamonar codesar	0,554936886	0,03885631	0,297991365	0,853229105	TCARI
29/06/2023	caldera de taburiente	0,579552352	0,14949495	0,200010777	0,999931335	NDVI
29/06/2023	caldera de taburiente	0,584059894	0,10511136	0,104790397	0,980959713	RENDVI
29/06/2023	caldera de taburiente	0,136862114	0,02067874	0,100010045	0,746489525	REPI
29/06/2023	caldera de taburiente	0,402795434	0,12326364	0,100022629	0,990381837	SAVI
29/06/2023	caldera de taburiente	0,29540053	0,06301706	0,100049831	0,994917929	TCARI
29/06/2023	pinar con cedros	0,362898201	0,08375318	0,200010777	0,831510961	NDVI
29/06/2023	pinar con cedros	0,452253699	0,05196089	0,107062034	0,835754037	RENDVI
29/06/2023	pinar con cedros	0,131994188	0,01937026	0,100010045	0,337526351	REPI
29/06/2023	pinar con cedros	0,232777029	0,06208562	0,100147948	0,629645586	SAVI
29/06/2023	pinar con cedros	0,34077552	0,07708827	0,109959751	0,920826972	TCARI
29/06/2023	pinar con codesos	0,630684376	0,11004604	0,203462988	0,944590747	NDVI
29/06/2023	pinar con codesos	0,602448106	0,07937711	0,197130114	0,916108549	RENDVI
29/06/2023	pinar con codesos	0,137848601	0,01904089	0,100010306	0,365832895	REPI
29/06/2023	pinar con codesos	0,462904125	0,09227595	0,129475459	0,934265792	SAVI
29/06/2023	pinar con codesos	0,298282146	0,04987479	0,100049831	0,673936427	TCARI
29/06/2023	pinar palmero	0,63957572	0,11854224	0,200065389	0,96171397	NDVI
29/06/2023	pinar palmero	0,626640618	0,09407631	0,104790397	0,963407993	RENDVI
29/06/2023	pinar palmero	0,137173548	0,02208577	0,100010045	0,746489525	REPI
29/06/2023	pinar palmero	0,436290473	0,11132316	0,100022629	0,885141313	SAVI
29/06/2023	pinar palmero	0,273055613	0,05039577	0,100066058	0,758262694	TCARI
29/06/2023	retamonar codesar	0,489528537	0,11569571	0,200022861	0,854891181	NDVI
29/06/2023	retamonar codesar	0,520667434	0,06850017	0,168207064	0,80284816	RENDVI
29/06/2023	retamonar codesar	0,140014976	0,01748692	0,100010067	0,281046987	REPI
29/06/2023	retamonar codesar	0,373658538	0,09734675	0,100561693	0,771553159	SAVI
29/06/2023	retamonar codesar	0,345627785	0,05486568	0,151620924	0,836787879	TCARI
27/09/2023	caldera de taburiente	0,576229274	0,17315605	0,200012922	0,999429047	NDVI
27/09/2023	caldera de taburiente	0,557748616	0,11455205	0,128857374	0,998190582	RENDVI
27/09/2023	caldera de taburiente	0,106447004	0,00680386	0,100010008	0,759202302	REPI
27/09/2023	caldera de taburiente	0,380697668	0,1422772	0,100010581	0,991756201	SAVI
27/09/2023	caldera de taburiente	0,238946944	0,07974037	0,100010023	0,987768412	TCARI
27/09/2023	pinar con cedros	0,334844291	0,08678038	0,200012922	0,886915267	NDVI
27/09/2023	pinar con cedros	0,42546311	0,03999	0,128927335	0,84043026	RENDVI
27/09/2023	pinar con cedros	0,1070842	0,01015297	0,100010075	0,232412979	REPI
27/09/2023	pinar con cedros	0,218987986	0,06786674	0,100010581	0,754859924	SAVI
27/09/2023	pinar con cedros	0,332657784	0,08185019	0,100013018	0,987768412	TCARI
27/09/2023	pinar con codesos	0,666015208	0,10988231	0,201698124	0,952968776	NDVI
27/09/2023	pinar con codesos	0,607030988	0,07946243	0,224818319	0,917328775	RENDVI
27/09/2023	pinar con codesos	0,10573867	0,00480772	0,100010753	0,155795485	REPI
27/09/2023	pinar con codesos	0,4596591	0,10661156	0,104608655	0,980706751	SAVI
27/09/2023	pinar con codesos	0,234643534	0,05646817	0,100010023	0,676808298	TCARI
27/09/2023	pinar palmero	0,666708529	0,12602191	0,200013787	0,985431373	NDVI
27/09/2023	pinar palmero	0,621357799	0,09586988	0,128857374	0,965412021	RENDVI
27/09/2023	pinar palmero	0,106532387	0,00648451	0,100010008	0,759202302	REPI
27/09/2023	pinar palmero	0,439271599	0,12467428	0,100016192	0,925697327	SAVI
27/09/2023	pinar palmero	0,207078159	0,06622015	0,100010023	0,660442412	TCARI
27/09/2023	retamonar codesar	0,472119689	0,13293856	0,200015545	0,883333504	NDVI
27/09/2023	retamonar codesar	0,478381723	0,06630499	0,167726144	0,80297035	RENDVI
27/09/2023	retamonar codesar	0,105277784	0,00481592	0,100010075	0,142558962	REPI
27/09/2023	retamonar codesar	0,320563138	0,11499577	0,100010581	0,839687109	SAVI

27/09/2023	retamonar codesar	0,272438735	0,06193884	0,100014925	0,703590155	TCARI
07/01/2024	caldera de taburiente	0,630287528	0,18956394	0,200010031	0,999050498	NDVI
07/01/2024	caldera de taburiente	0,703949988	0,07896994	0,131278738	0,994656086	RENDVI
07/01/2024	caldera de taburiente	0,32296592	0,09377194	0,100015886	0,986267745	REPI
07/01/2024	caldera de taburiente	0,447130054	0,14716764	0,100150883	0,99096036	SAVI
07/01/2024	caldera de taburiente	0,269194067	0,06846559	0,101212144	0,987400591	TCARI
07/01/2024	pinar con cedros	0,361356735	0,10823389	0,200010031	0,908921599	NDVI
07/01/2024	pinar con cedros	0,61114502	0,03112677	0,479373395	0,908589005	RENDVI
07/01/2024	pinar con cedros	0,347396046	0,08287881	0,107052058	0,986267745	REPI
07/01/2024	pinar con cedros	0,28611657	0,0807355	0,101059183	0,830975354	SAVI
07/01/2024	pinar con cedros	0,360906184	0,06709249	0,146830946	0,987400591	TCARI
07/01/2024	pinar con codesos	0,721292496	0,10719484	0,201159477	0,999050498	NDVI
07/01/2024	pinar con codesos	0,731918335	0,05392674	0,193993121	0,994656086	RENDVI
07/01/2024	pinar con codesos	0,300911039	0,09046998	0,100514367	0,7945804	REPI
07/01/2024	pinar con codesos	0,492186278	0,10131796	0,151560128	0,813982368	SAVI
07/01/2024	pinar con codesos	0,252289325	0,04535618	0,101469815	0,588433921	TCARI
07/01/2024	pinar palmero	0,719758153	0,14331599	0,200023398	0,986488283	NDVI
07/01/2024	pinar palmero	0,744462252	0,0683631	0,131278738	0,991440177	RENDVI
07/01/2024	pinar palmero	0,343442321	0,09743213	0,100231081	0,858347476	REPI
07/01/2024	pinar palmero	0,51913178	0,12732103	0,112097807	0,972379267	SAVI
07/01/2024	pinar palmero	0,247429594	0,05881425	0,101212144	0,822726965	TCARI
07/01/2024	retamonar codesar	0,525038242	0,1475711	0,200011864	0,992248833	NDVI
07/01/2024	retamonar codesar	0,650852025	0,04799991	0,137438431	0,964860439	RENDVI
07/01/2024	retamonar codesar	0,266405016	0,06363827	0,102927506	0,681493819	REPI
07/01/2024	retamonar codesar	0,340333551	0,09220549	0,100283846	0,798539102	SAVI
07/01/2024	retamonar codesar	0,276483804	0,04947661	0,107368343	0,684687436	TCARI
16/03/2024	caldera de taburiente	0,578718126	0,18563238	0,200010657	0,999632239	NDVI
16/03/2024	caldera de taburiente	0,564919651	0,11465875	0,108770221	0,998355567	RENDVI
16/03/2024	caldera de taburiente	0,47330901	0,06080616	0,162282288	0,993710339	REPI
16/03/2024	caldera de taburiente	0,407624871	0,14258815	0,100041971	0,996446669	SAVI
16/03/2024	caldera de taburiente	0,407028764	0,05025357	0,165037915	0,989277303	TCARI
16/03/2024	pinar con cedros	0,335715413	0,09975019	0,200010657	0,881237686	NDVI
16/03/2024	pinar con cedros	0,440519214	0,04473856	0,197102338	0,835249245	RENDVI
16/03/2024	pinar con cedros	0,485055715	0,05622852	0,303039968	0,993710339	REPI
16/03/2024	pinar con cedros	0,256326169	0,07700547	0,100477256	0,87246573	SAVI
16/03/2024	pinar con cedros	0,46977222	0,05080048	0,314445108	0,980754554	TCARI
16/03/2024	pinar con codesos	0,644430161	0,11934572	0,200080678	0,909813106	NDVI
16/03/2024	pinar con codesos	0,597410381	0,08096576	0,183871195	0,872874916	RENDVI
16/03/2024	pinar con codesos	0,476100177	0,05102911	0,299614102	0,682859361	REPI
16/03/2024	pinar con codesos	0,461264253	0,09900007	0,113087952	0,773485303	SAVI
16/03/2024	pinar con codesos	0,40030539	0,03169116	0,247357249	0,680095017	TCARI
16/03/2024	pinar palmero	0,67531544	0,14307508	0,200011313	0,992873371	NDVI
16/03/2024	pinar palmero	0,627557158	0,1003815	0,143439859	0,940489948	RENDVI
16/03/2024	pinar palmero	0,482605249	0,06522764	0,274498254	0,831740737	REPI
16/03/2024	pinar palmero	0,476119339	0,12292349	0,100426599	0,938607931	SAVI
16/03/2024	pinar palmero	0,389918625	0,04381126	0,283650666	0,831231534	TCARI
16/03/2024	retamonar codesar	0,438739508	0,13442761	0,200010657	0,864510536	NDVI
16/03/2024	retamonar codesar	0,47673139	0,06451564	0,225520834	0,814719796	RENDVI
16/03/2024	retamonar codesar	0,450288683	0,0411865	0,219346493	0,742887378	REPI
16/03/2024	retamonar codesar	0,305995613	0,09963687	0,100147903	0,818489373	SAVI

16/03/2024	retamonar codesar	0,422848552	0,0399113	0,305776179	0,763919234	TCARI
15/06/2024	caldera de taburiente	0,54156369	0,1561777	0,200011596	0,993681788	NDVI
15/06/2024	caldera de taburiente	0,468258351	0,12004382	0,118137389	0,994911075	RENDVI
15/06/2024	caldera de taburiente	0,245252073	0,04852374	0,100011475	0,747969985	REPI
15/06/2024	caldera de taburiente	0,380084008	0,11020422	0,100043386	0,993663609	SAVI
15/06/2024	caldera de taburiente	0,270921677	0,06141034	0,100037068	0,992662668	TCARI
15/06/2024	pinar con cedros	0,357214004	0,09444168	0,200012386	0,936397731	NDVI
15/06/2024	pinar con cedros	0,344906598	0,05377863	0,123527519	0,866297603	RENDVI
15/06/2024	pinar con cedros	0,230882227	0,04895051	0,100013144	0,672994196	REPI
15/06/2024	pinar con cedros	0,250864655	0,05888696	0,100043386	0,783840239	SAVI
15/06/2024	pinar con cedros	0,324591875	0,06720299	0,100845762	0,933387876	TCARI
15/06/2024	pinar con codesos	0,619589806	0,11467279	0,203869104	0,953360796	NDVI
15/06/2024	pinar con codesos	0,518172204	0,09654319	0,194179043	0,92333734	RENDVI
15/06/2024	pinar con codesos	0,271298051	0,03648644	0,100045994	0,665857613	REPI
15/06/2024	pinar con codesos	0,459705055	0,08461922	0,114967056	0,96231252	SAVI
15/06/2024	pinar con codesos	0,269218802	0,04344432	0,101531014	0,676479936	TCARI
15/06/2024	pinar palmero	0,617474735	0,13107771	0,200026974	0,993681788	NDVI
15/06/2024	pinar palmero	0,528998196	0,11329579	0,118137389	0,983721852	RENDVI
15/06/2024	pinar palmero	0,243566811	0,04485426	0,100011922	0,548546851	REPI
15/06/2024	pinar palmero	0,421678334	0,09412161	0,100320436	0,878015995	SAVI
15/06/2024	pinar palmero	0,243167654	0,04706239	0,100037068	0,747931123	TCARI
15/06/2024	retamonar codesar	0,444083452	0,12718147	0,200011894	0,861440659	NDVI
15/06/2024	retamonar codesar	0,395146102	0,07503178	0,169705629	0,758631051	RENDVI
15/06/2024	retamonar codesar	0,273121089	0,047543	0,100259714	0,747969985	REPI
15/06/2024	retamonar codesar	0,348254234	0,10960829	0,100951485	0,788877964	SAVI
15/06/2024	retamonar codesar	0,320531219	0,05592181	0,144661233	0,939152598	TCARI
26/08/2024	caldera de taburiente	0,512561083	0,14721628	0,200010628	0,999801934	NDVI
26/08/2024	caldera de taburiente	0,458731502	0,1040564	0,1065294	0,9840312	RENDVI
26/08/2024	caldera de taburiente	0,783372581	0,02868559	0,22363542	0,996288002	REPI
26/08/2024	caldera de taburiente	0,345560193	0,1091295	0,100017376	0,997702241	SAVI
26/08/2024	caldera de taburiente	0,776131749	0,01327741	0,23954381	0,991452694	TCARI
26/08/2024	pinar con cedros	0,325209647	0,08526611	0,200010628	0,847638488	NDVI
26/08/2024	pinar con cedros	0,345640212	0,05015172	0,1065294	0,800696492	RENDVI
26/08/2024	pinar con cedros	0,78178668	0,02783039	0,664557576	0,996288002	REPI
26/08/2024	pinar con cedros	0,215334222	0,04987321	0,100033171	0,682939827	SAVI
26/08/2024	pinar con cedros	0,788181126	0,0149823	0,323012412	0,894926906	TCARI
26/08/2024	pinar con codesos	0,610532582	0,10751342	0,204035357	0,974956095	NDVI
26/08/2024	pinar con codesos	0,51276505	0,0822607	0,23282516	0,875302374	RENDVI
26/08/2024	pinar con codesos	0,802806795	0,02063872	0,689713299	0,934786916	REPI
26/08/2024	pinar con codesos	0,441376299	0,08417288	0,107608207	0,997702241	SAVI
26/08/2024	pinar con codesos	0,776677728	0,00847046	0,661345005	0,838939488	TCARI
26/08/2024	pinar palmero	0,578433156	0,11796116	0,200011656	0,972079635	NDVI
26/08/2024	pinar palmero	0,508139789	0,09210032	0,113781497	0,938953459	RENDVI
26/08/2024	pinar palmero	0,782473981	0,02773398	0,653846681	0,909217179	REPI
26/08/2024	pinar palmero	0,384708166	0,09162138	0,100034565	0,783609867	SAVI
26/08/2024	pinar palmero	0,770822287	0,01033592	0,23954381	0,854639173	TCARI
26/08/2024	retamonar codesar	0,41833514	0,11797042	0,200011656	0,87196368	NDVI
26/08/2024	retamonar codesar	0,390501469	0,06401145	0,159300536	0,788869381	RENDVI
26/08/2024	retamonar codesar	0,797559559	0,02627881	0,700268686	0,913518548	REPI
26/08/2024	retamonar codesar	0,31173107	0,10625971	0,100017376	0,806549788	SAVI

26/08/2024	retamonar codesar	0,788013637	0,00923485	0,74033761	0,856796622	TCARI
------------	-------------------	-------------	------------	------------	-------------	-------

ANEXO IV. Mapas generados con Python

Contiene los mapas de visualización inicial elaborados directamente con Python. Estos mapas permiten una visualización preliminar de la distribución espacial de los índices, sin intervención manual o ajustes en software QGIS.

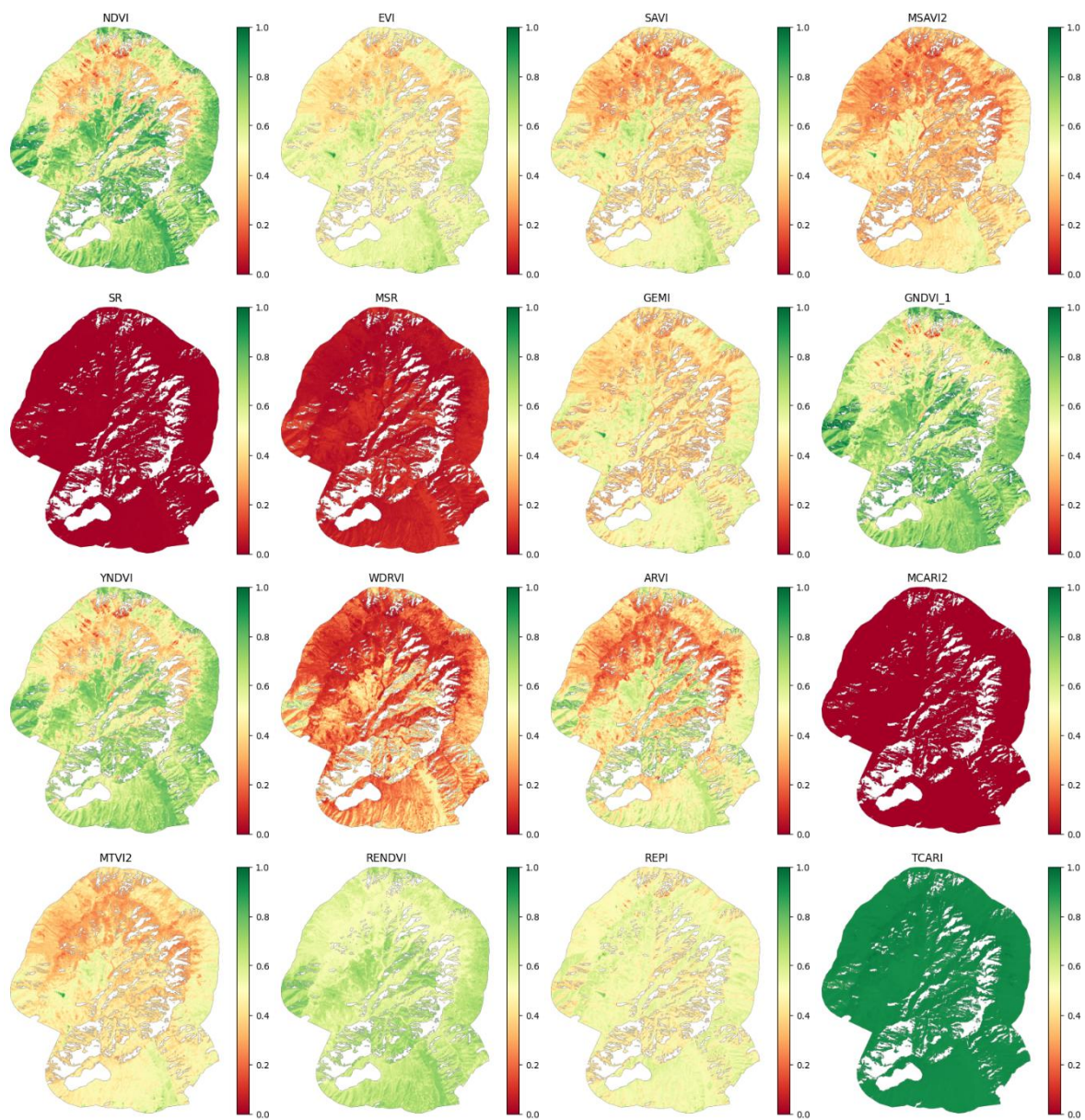


Figura AIV.1 Visualización de los índices BBG y de los índices NGB generados a partir de la imagen PlanetScope del 24 de febrero de 2021. Se muestran los mapas normalizados en el rango $[0,1]$.

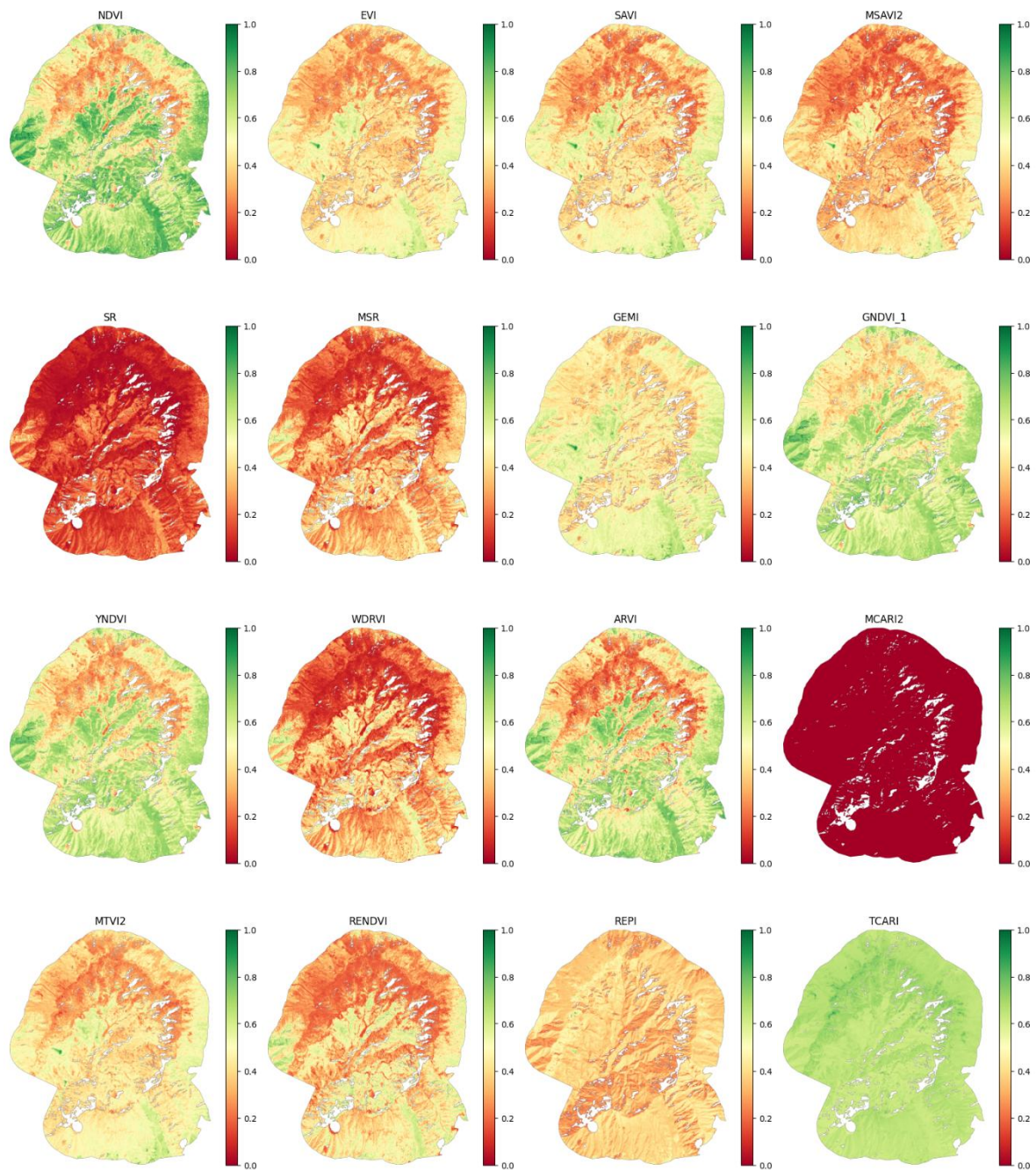


Figura AIV.2 Visualización de los índices BBG y de los índices NGB generados a partir de la imagen PlanetScope del 29 de marzo de 2021. Se muestran los mapas normalizados en el rango $[0,1]$.

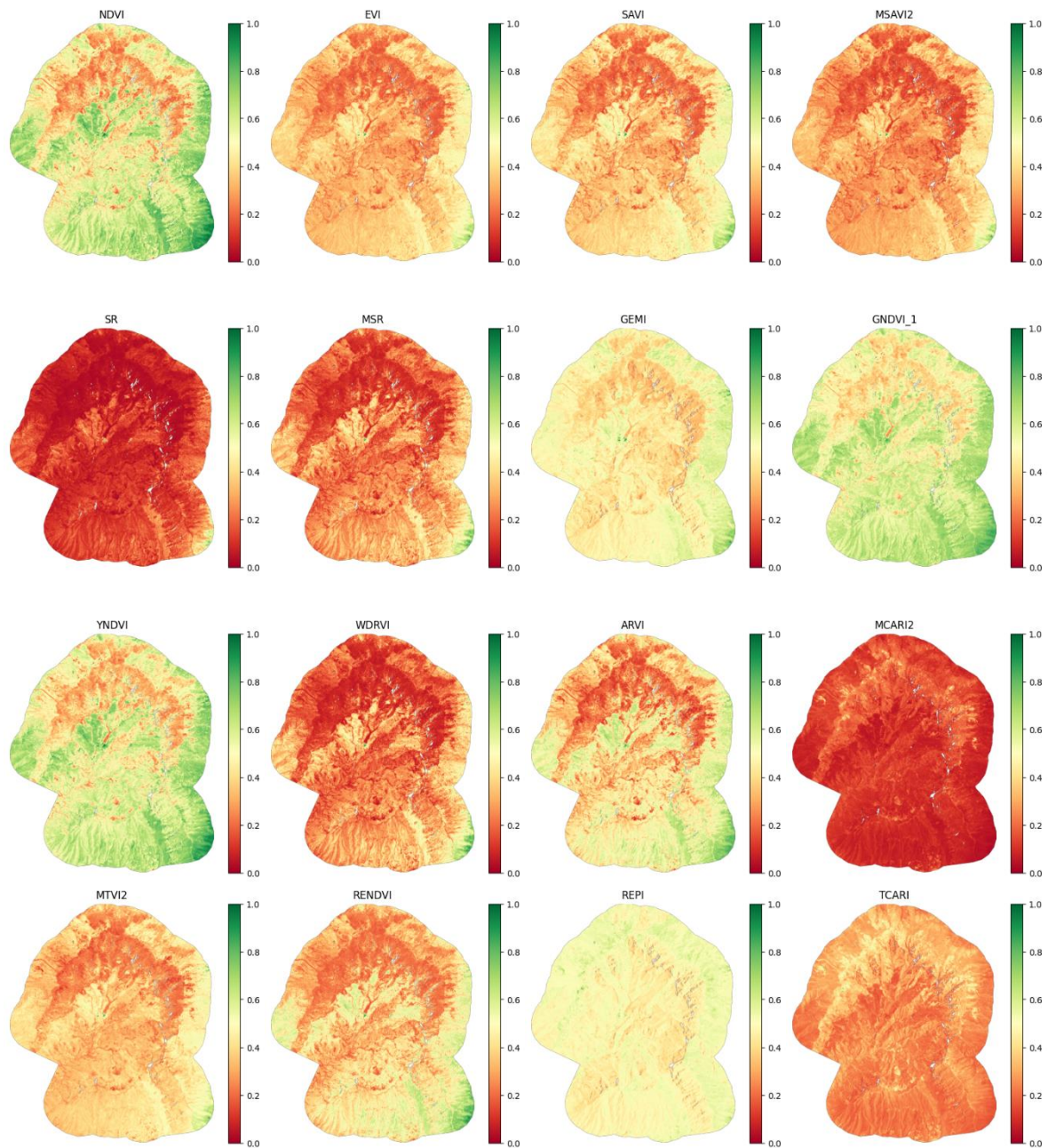


Figura AIV.3 Visualización de los índices BBG y de los índices NGB generados a partir de la imagen PlanetScope del 26 de junio de 2021. Se muestran los mapas normalizados en el rango $[0,1]$.

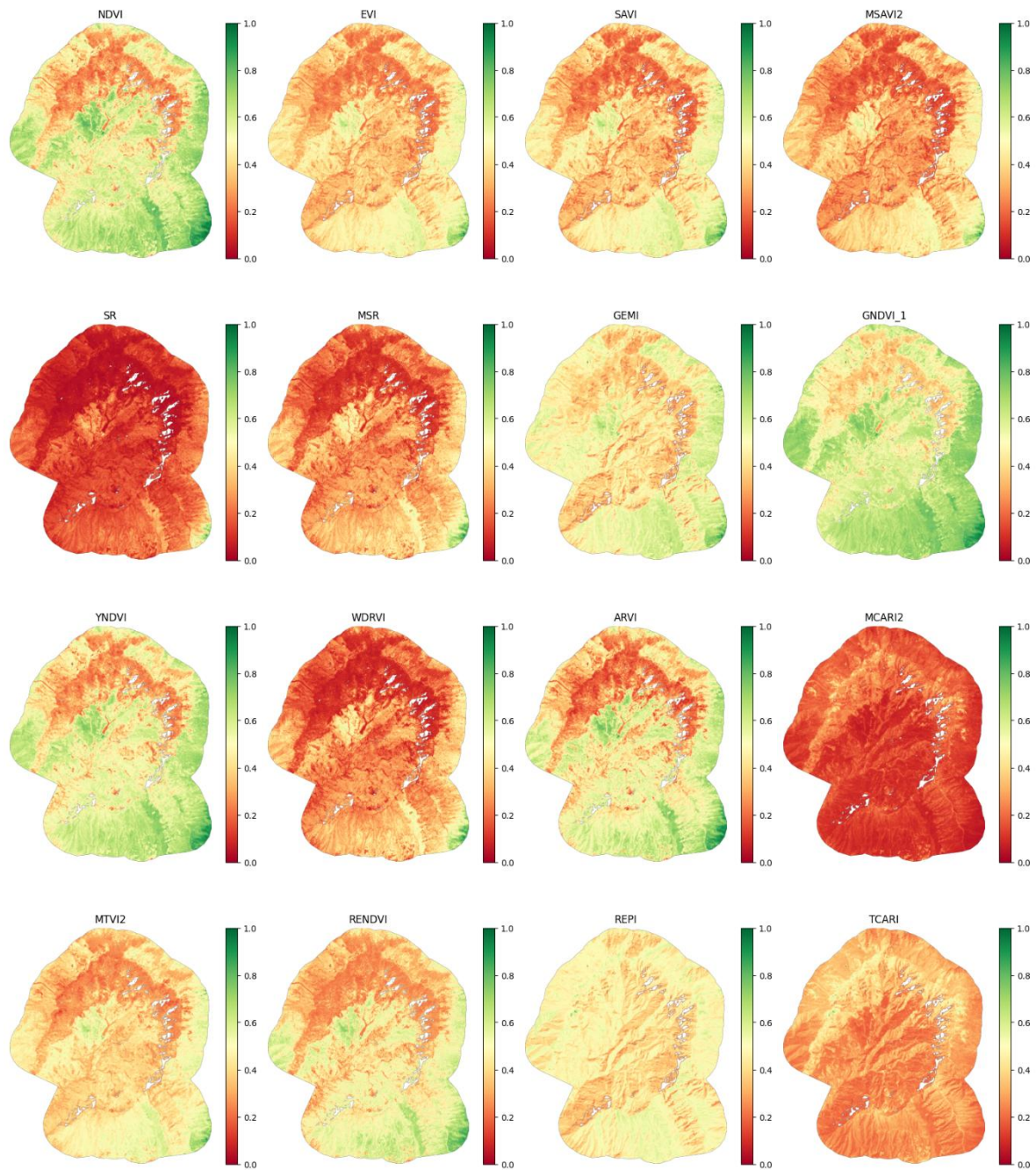


Figura AIV.4 Visualización de los índices BBG y de los índices NGB generados a partir de la imagen PlanetScope del 11 de septiembre de 2021. Se muestran los mapas normalizados en el rango $[0,1]$.

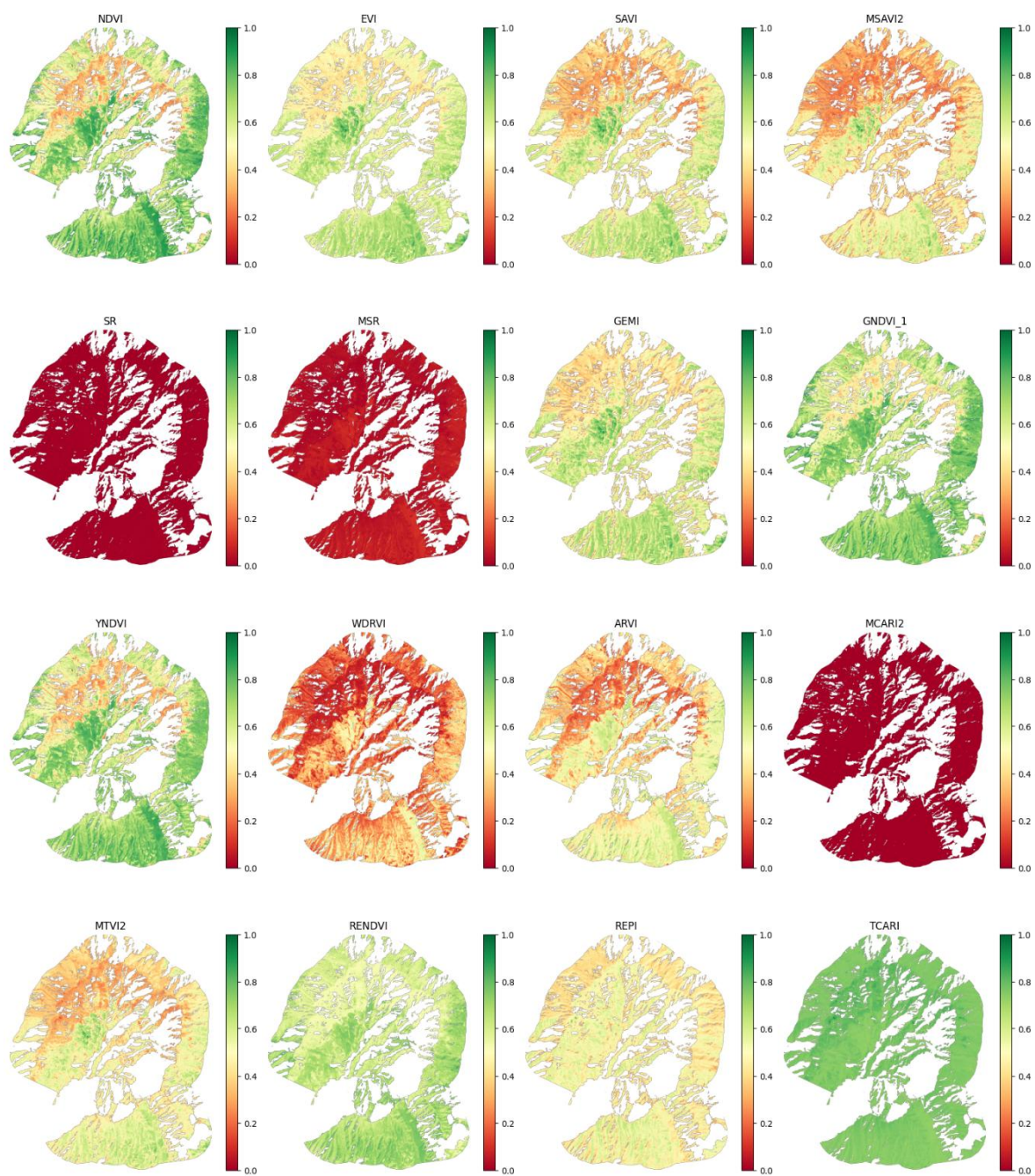


Figura AIV.5 Visualización de los índices BBG y de los índices NGB generados a partir de la imagen PlanetScope del 11 de enero de 2022. Se muestran los mapas normalizados en el rango $[0,1]$.

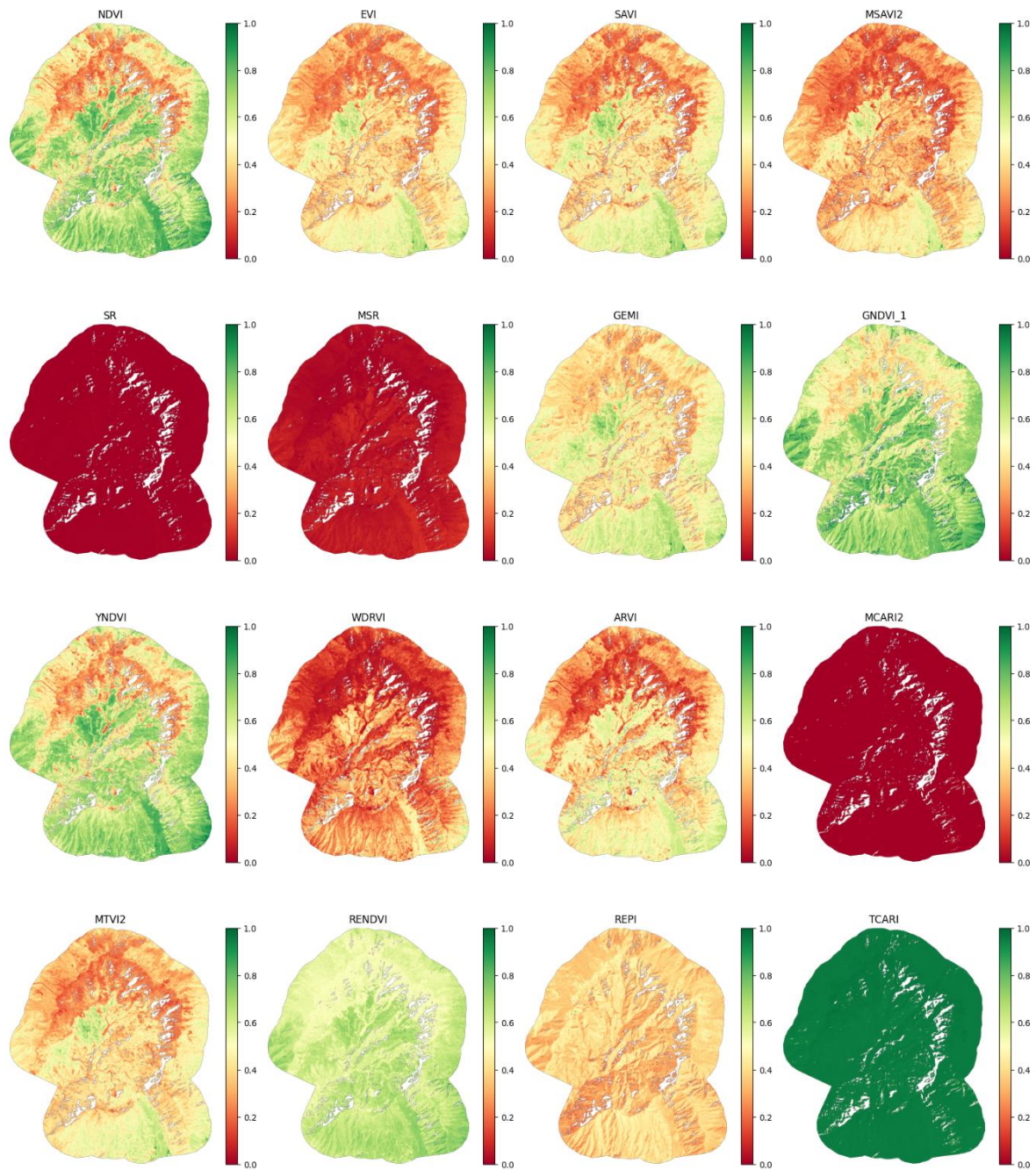


Figura AIV.6 Visualización de los índices BBG y de los índices NGB generados a partir de la imagen PlanetScope del 9 de abril de 2022. Se muestran los mapas normalizados en el rango $[0,1]$.

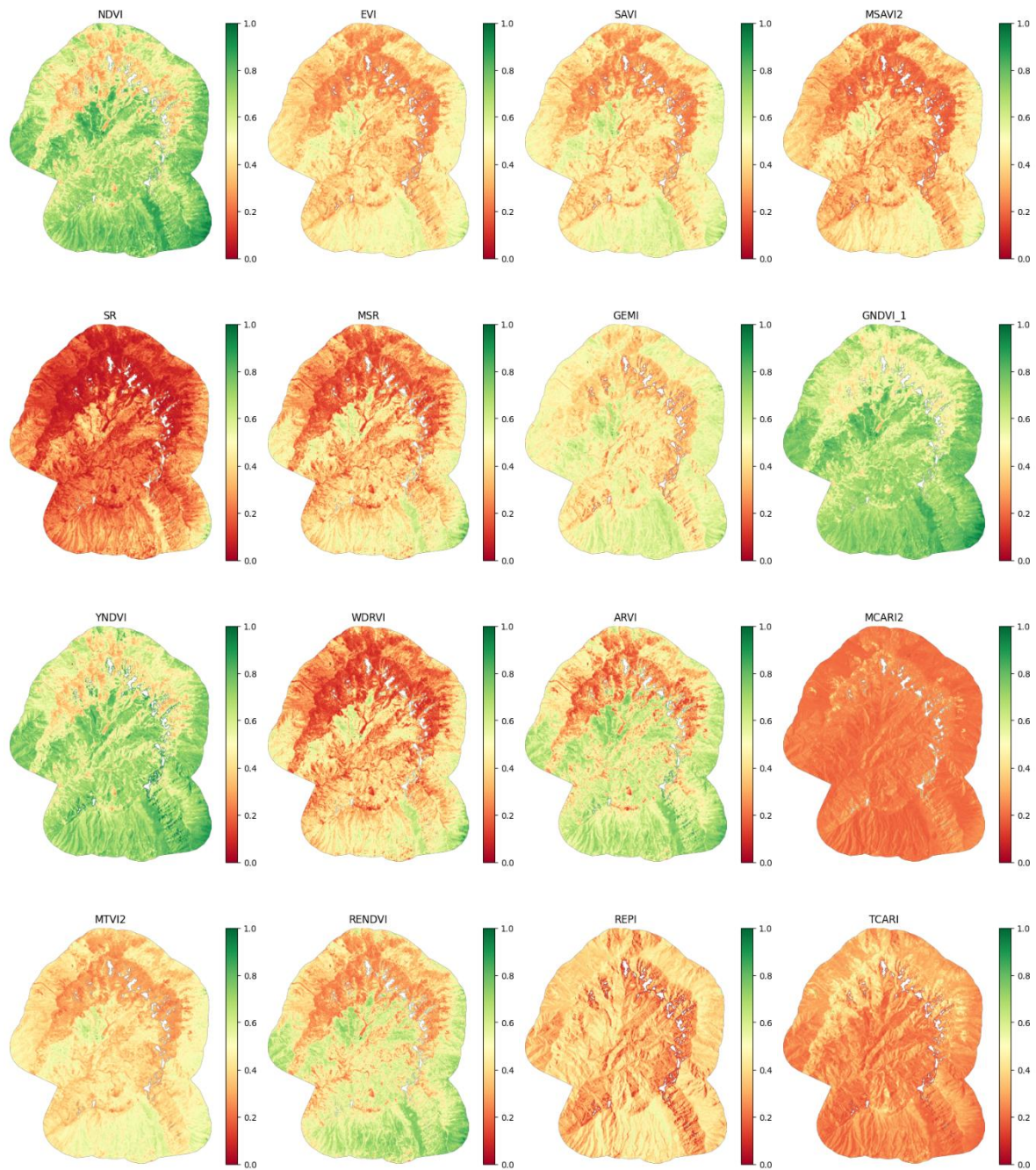


Figura AIV.7 Visualización de los índices BBG y de los índices NGB generados a partir de la imagen PlanetScope del 7 de junio de 2022. Se muestran los mapas normalizados en el rango $[0,1]$.

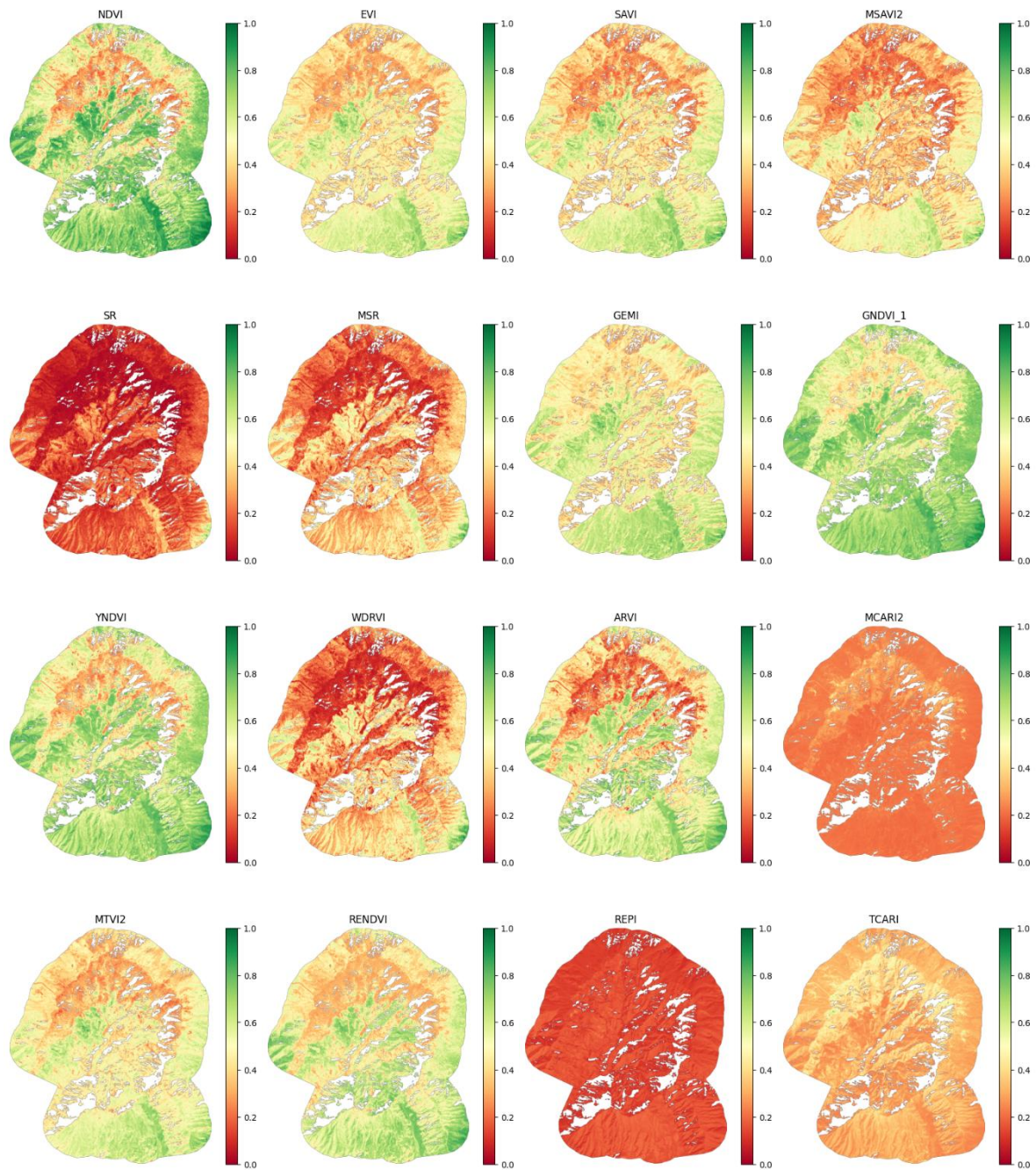


Figura AIV.8 Visualización de los índices BBG y de los índices NGB generados a partir de la imagen PlanetScope del 18 de octubre de 2022. Se muestran los mapas normalizados en el rango $[0,1]$.

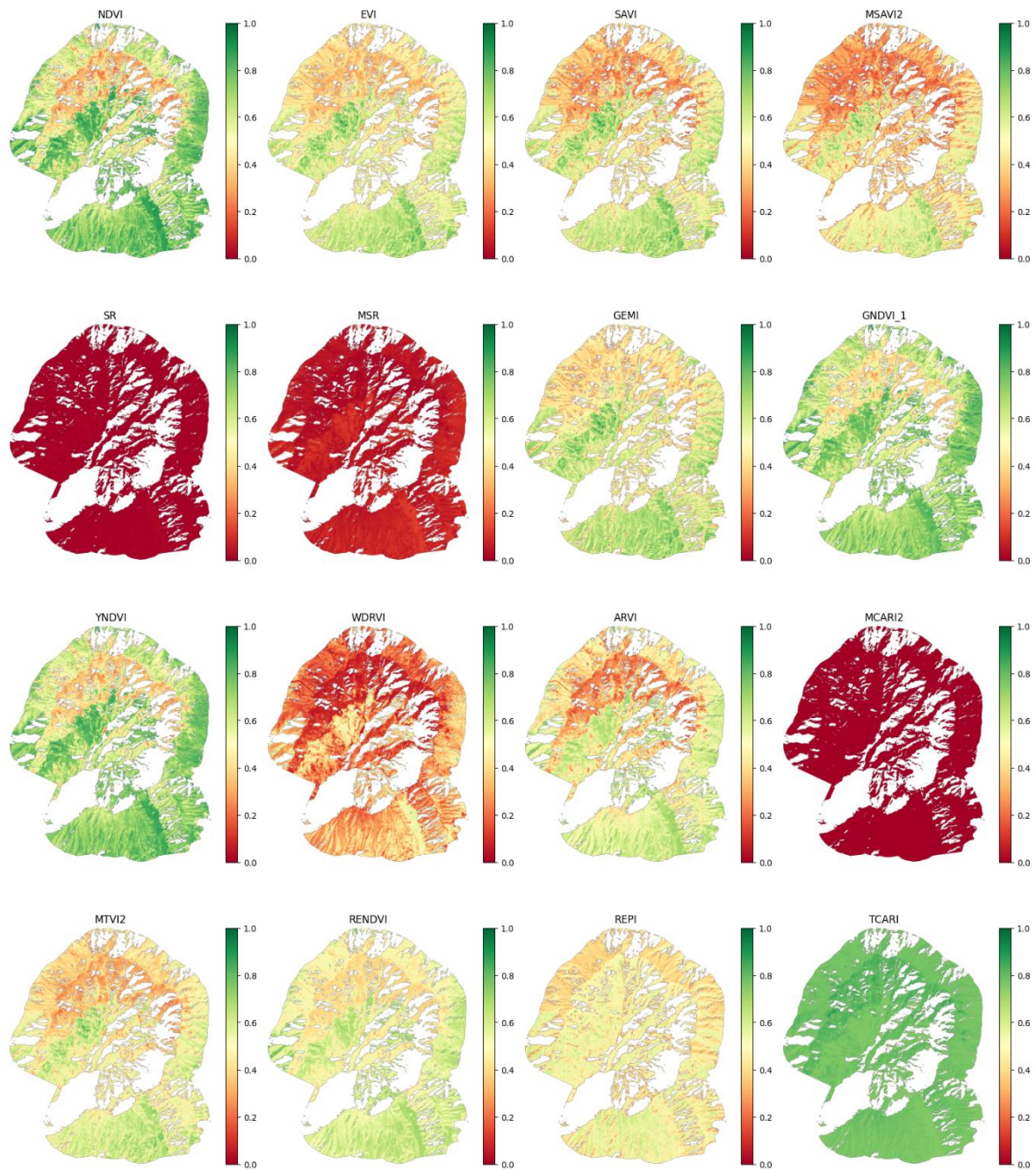


Figura AIV.9 Visualización de los índices BBG y de los índices NGB generados a partir de la imagen PlanetScope del 7 de enero de 2023. Se muestran los mapas normalizados en el rango $[0,1]$.

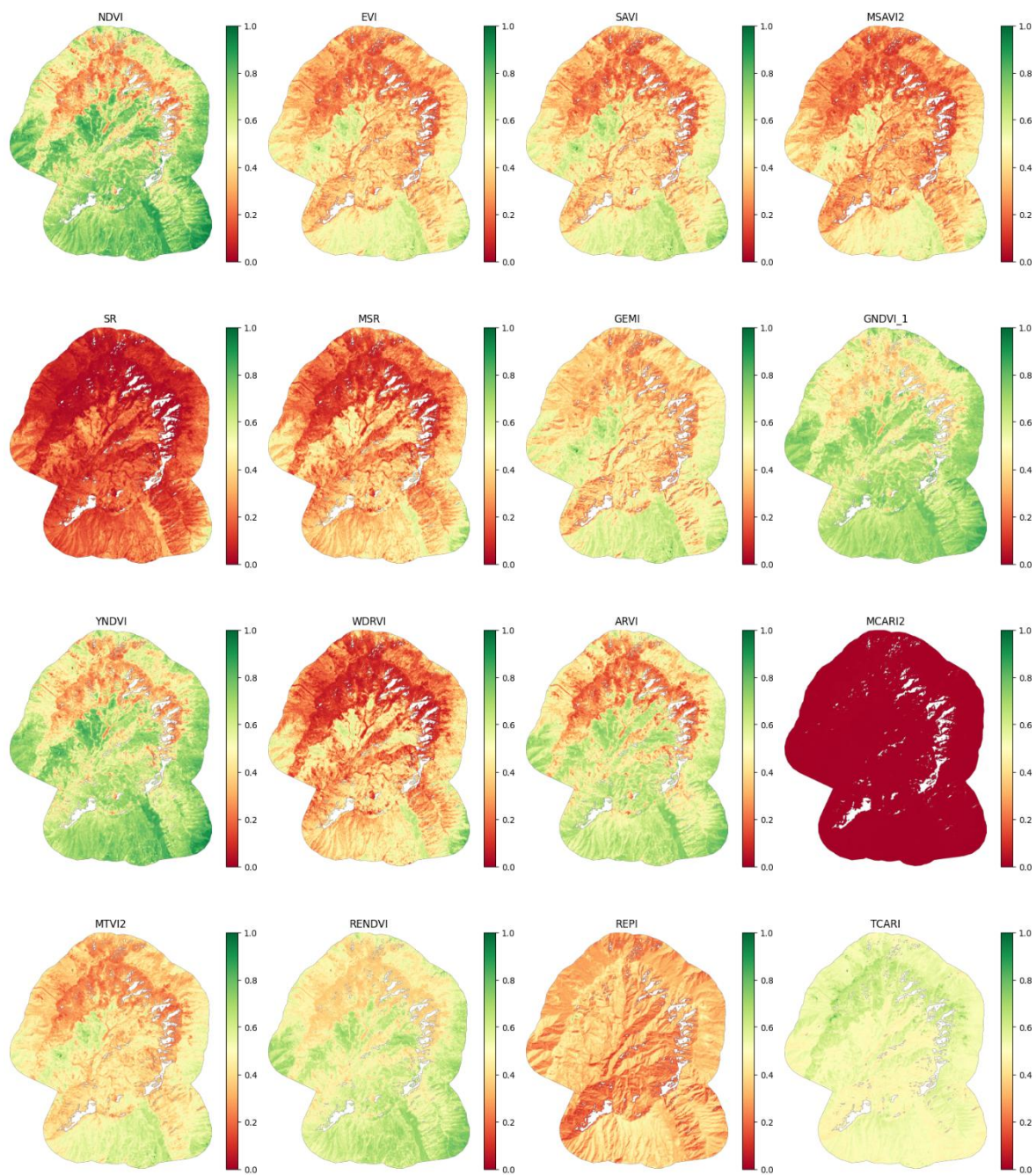


Figura AIV.10 Visualización de los índices BBG y de los índices NGB generados a partir de la imagen PlanetScope del 24 de marzo de 2023. Se muestran los mapas normalizados en el rango $[0,1]$.

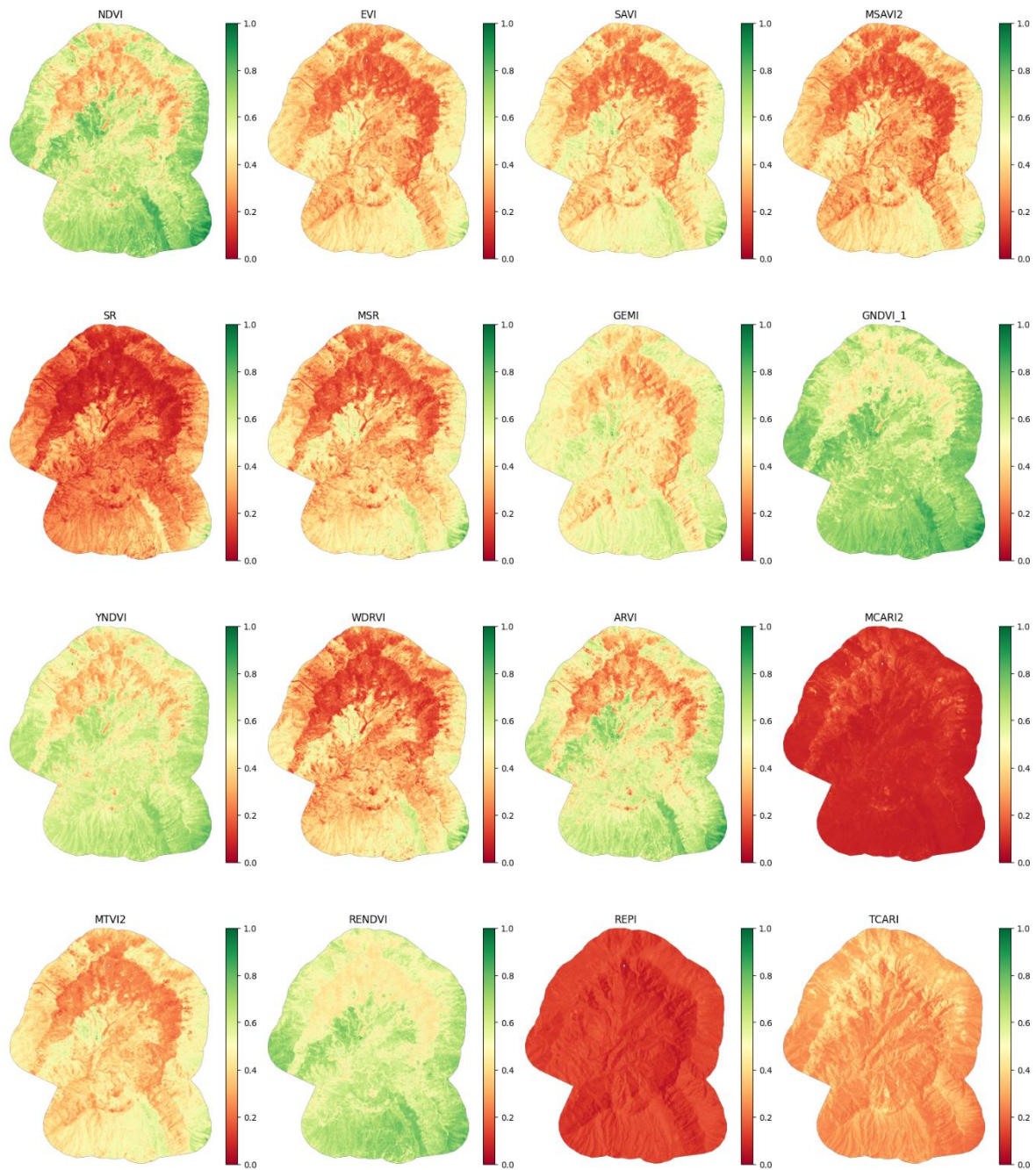


Figura AIV.11 Visualización de los índices BBG y de los índices NGB generados a partir de la imagen PlanetScope del 29 de junio de 2023. Se muestran los mapas normalizados en el rango $[0,1]$.

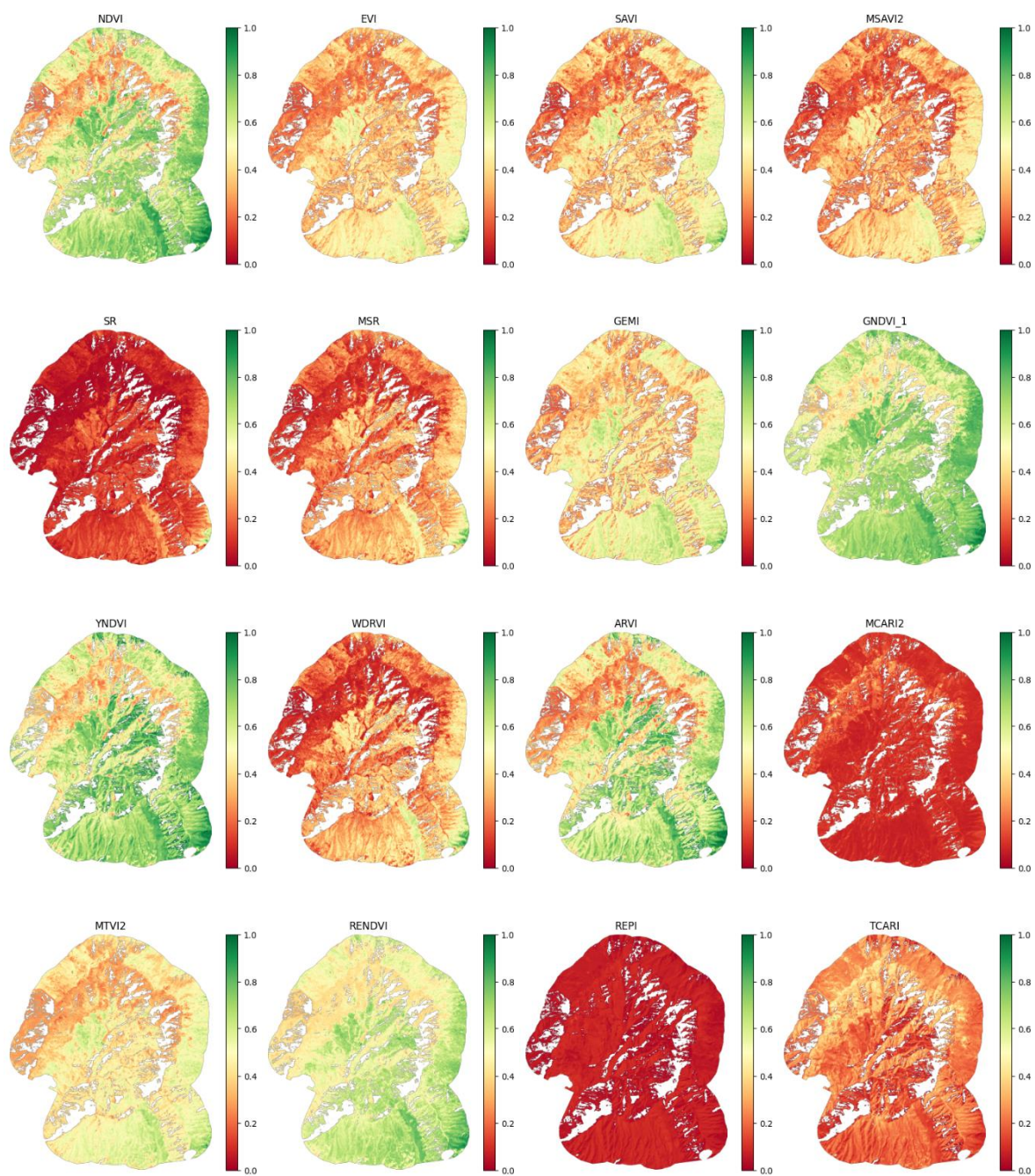


Figura AIV.12 Visualización de los índices BBG y de los índices NGB generados a partir de la imagen PlanetScope del 27 de septiembre de 2023. Se muestran los mapas normalizados en el rango $[0,1]$.

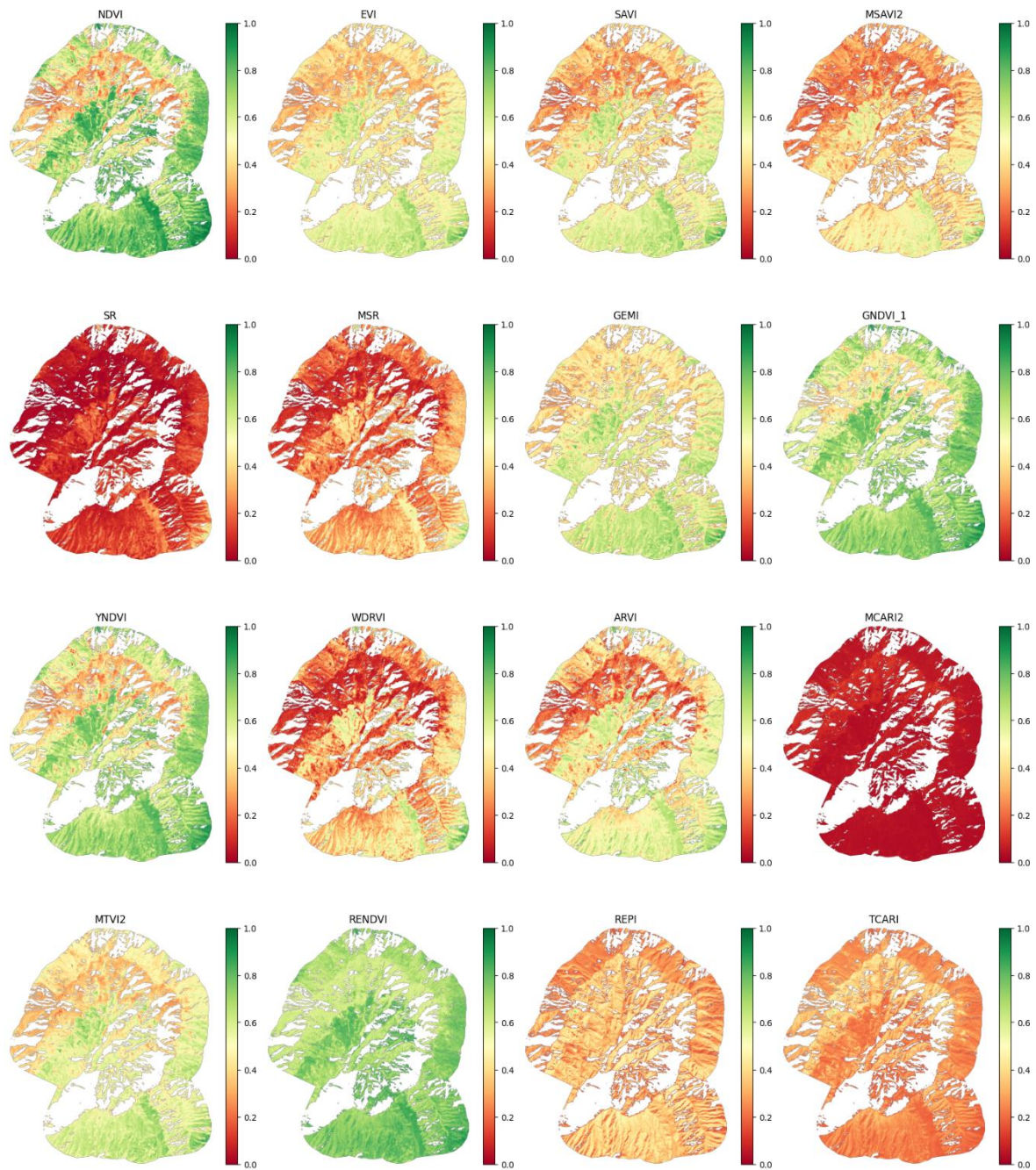


Figura AIV.13 Visualización de los índices BBG y de los índices NGB generados a partir de la imagen PlanetScope del 7 de enero de 2024. Se muestran los mapas normalizados en el rango $[0,1]$.

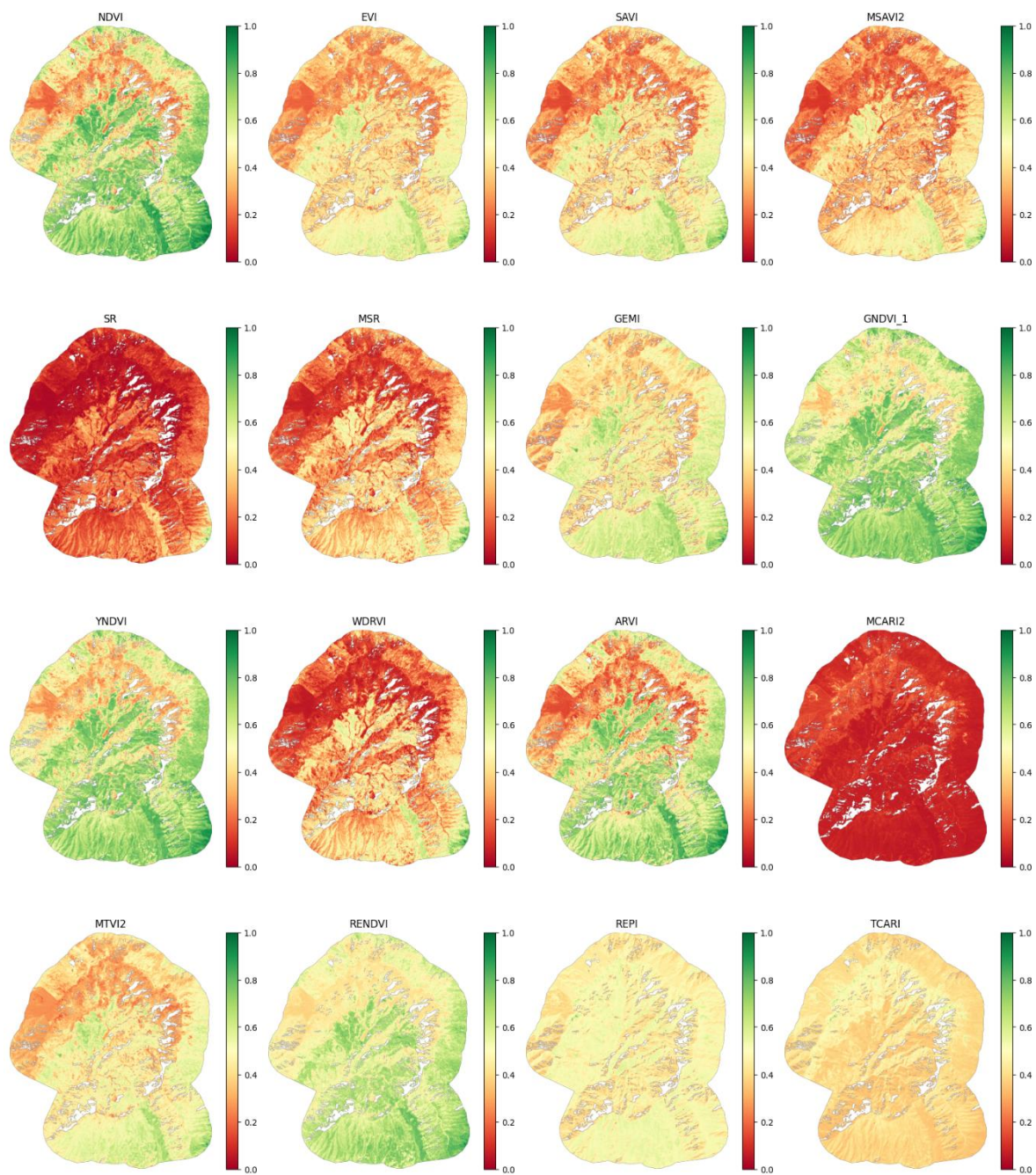


Figura AIV.14 Visualización de los índices BBG y de los índices NGB generados a partir de la imagen PlanetScope del 16 de marzo de 2024. Se muestran los mapas normalizados en el rango $[0,1]$.

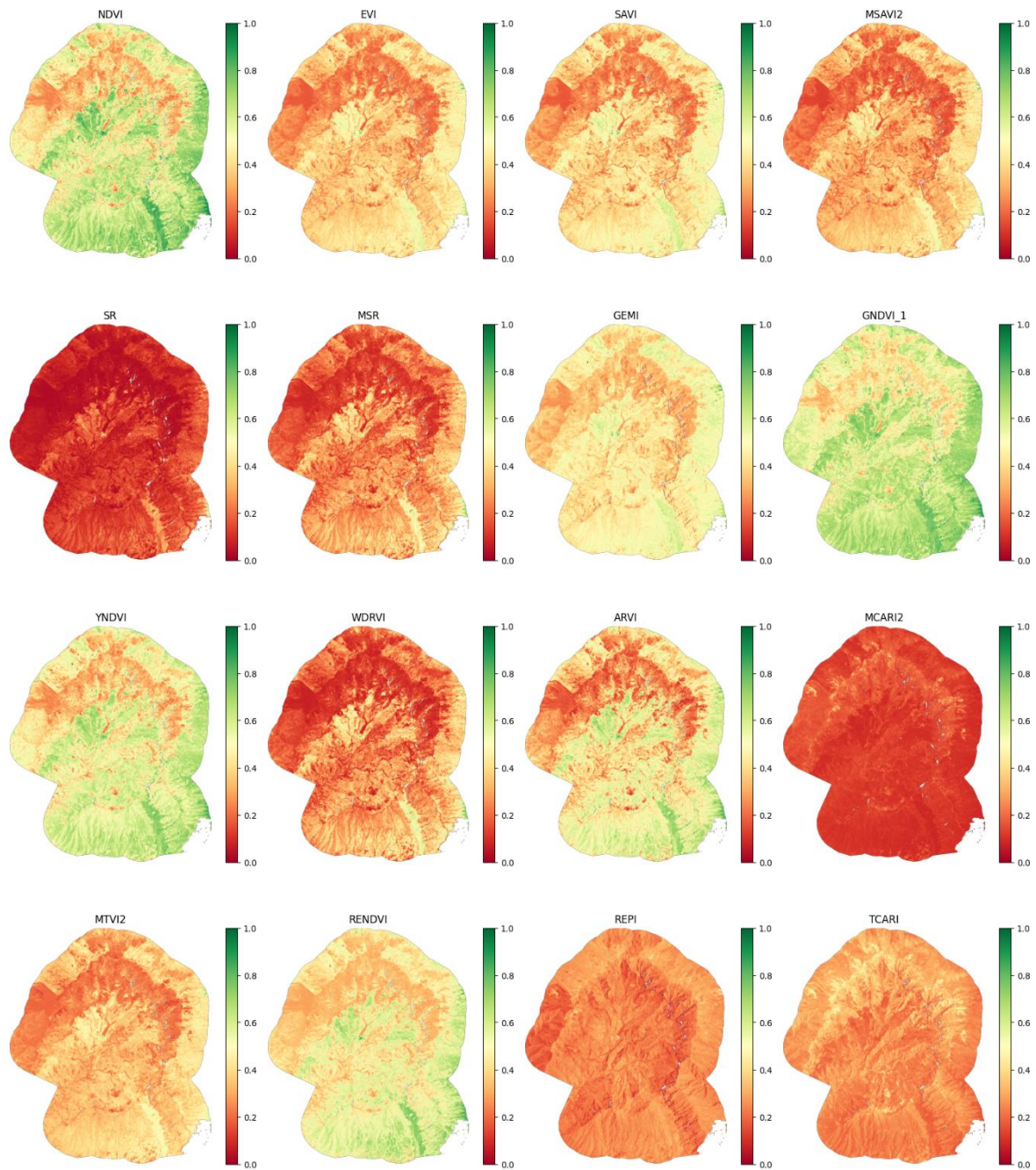


Figura AIV.15 Visualización de los índices BBG y de los índices NGB generados a partir de la imagen PlanetScope del 15 de junio de 2024. Se muestran los mapas normalizados en el rango $[0,1]$.

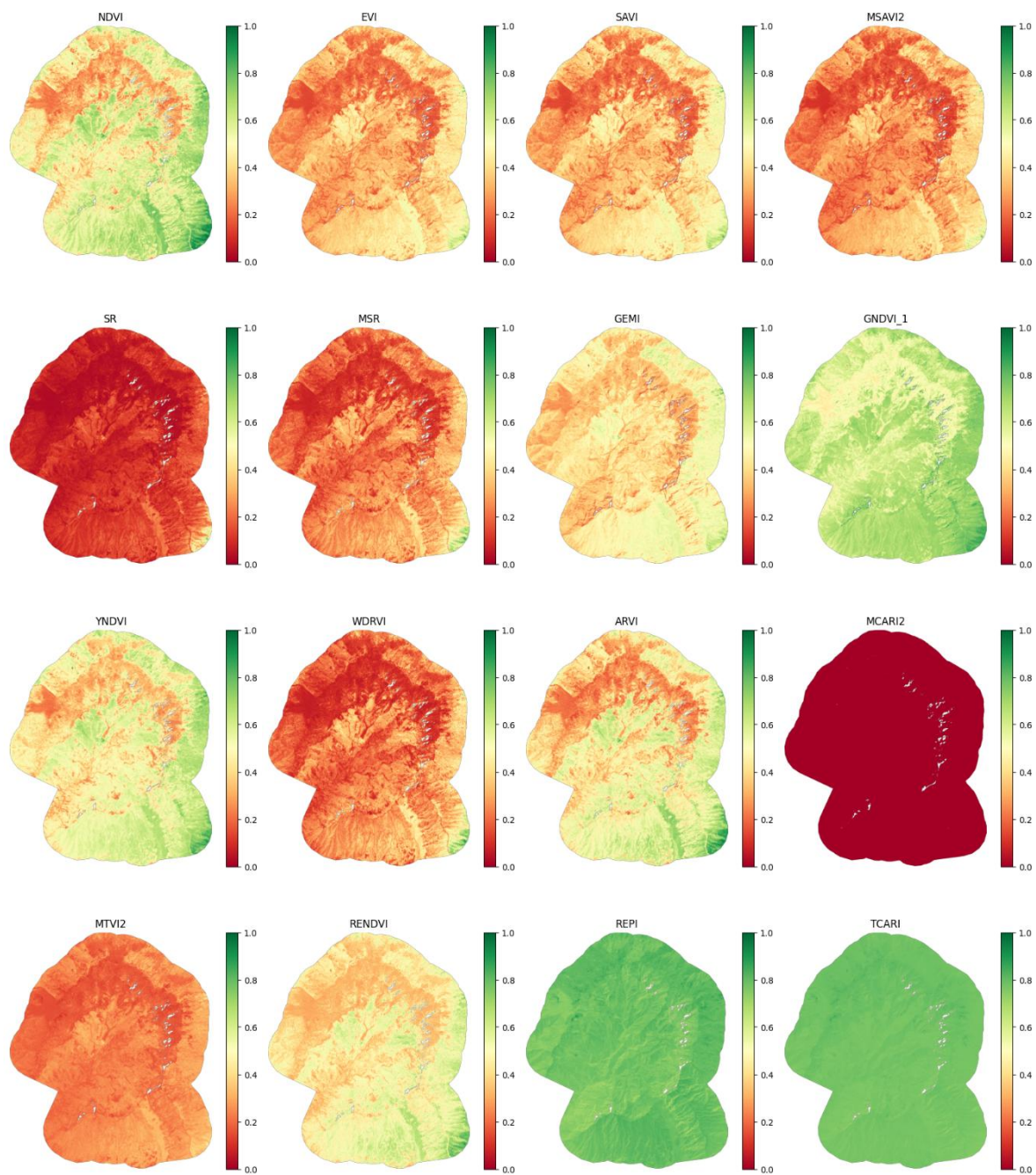


Figura AIV.16 Visualización de los índices BBG y de los índices NGB generados a partir de la imagen PlanetScope del 26 de agosto de 2024. Se muestran los mapas normalizados en el rango $[0,1]$.

ANEXO V. Mapas elaborados con QGIS

Incluye los mapas finales generados en QGIS a partir de los datos procesados. Estos mapas representan la distribución espacial de los índices de vegetación y las diferencias temporales de forma visualmente clara y detallada.

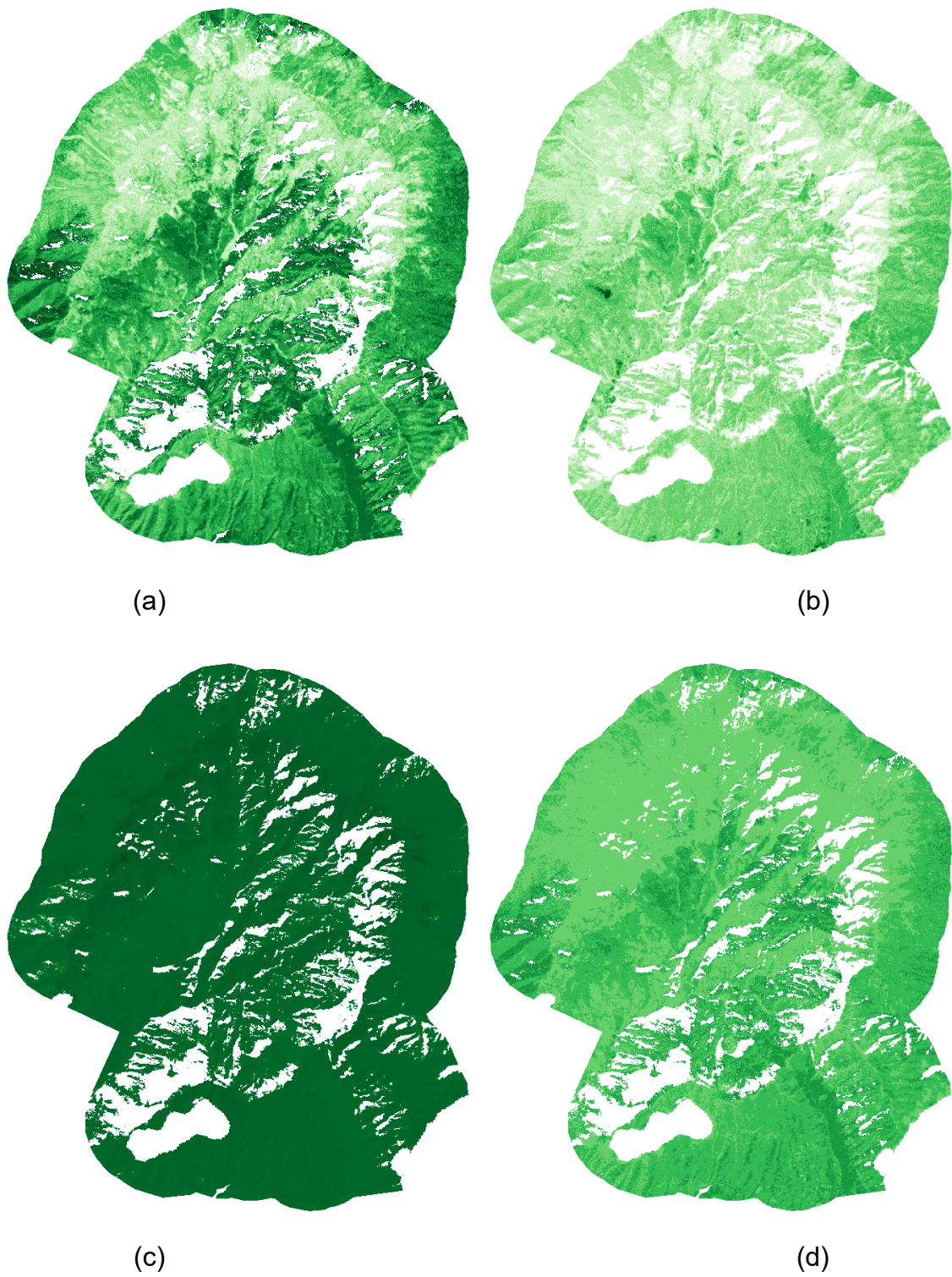


Figura AV.1. Mapas de los índices de vegetación seleccionados para el 24 de febrero de 2021: (a) NDVI, (b) SAVI, (c) TCARI y (d) RENDVI.

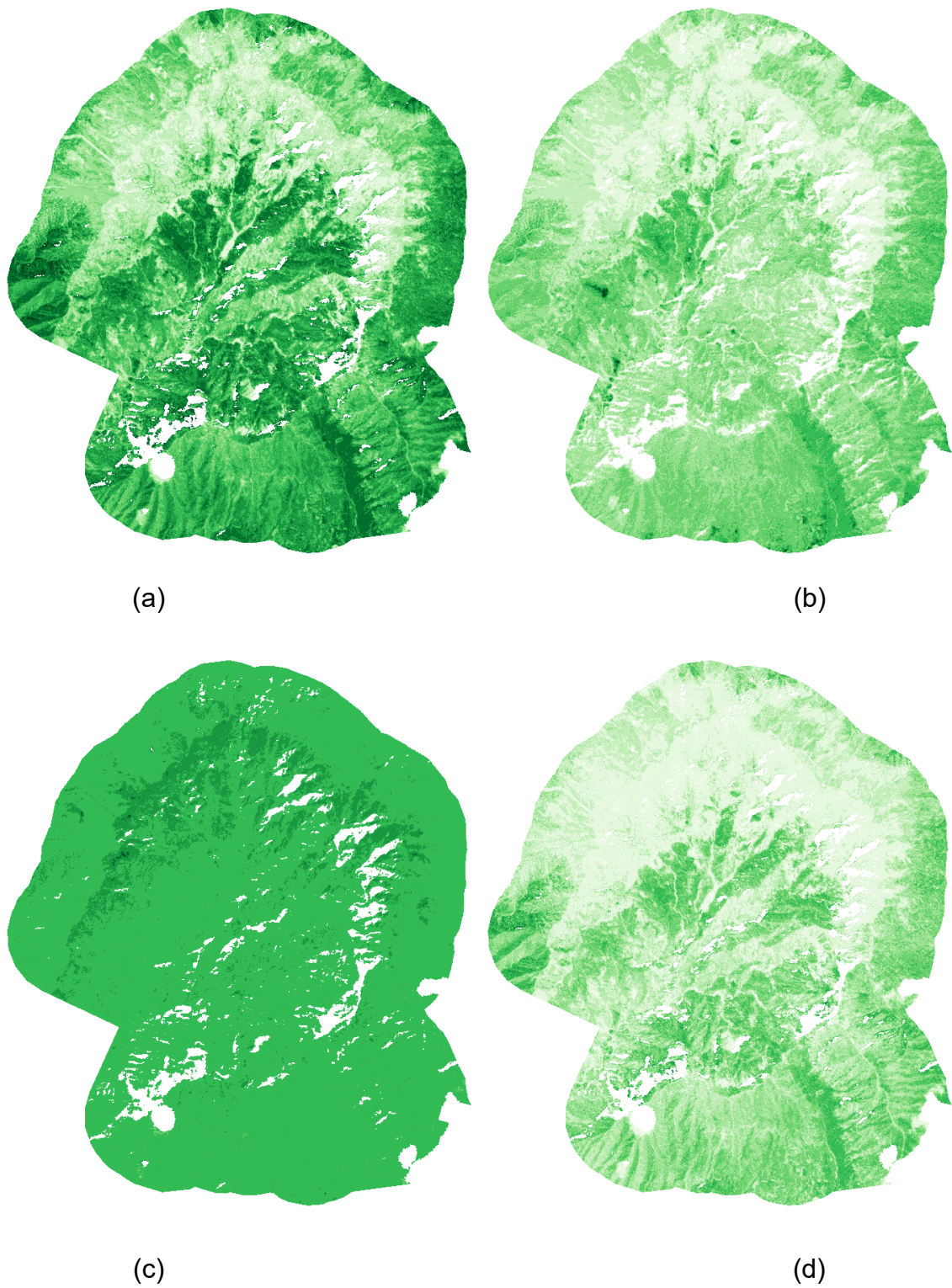


Figura AV.2. Mapas de los índices de vegetación seleccionados para el 13 de marzo de 2021: (a) NDVI, (b) SAVI, (c) TCARI y (d) RENDVI.

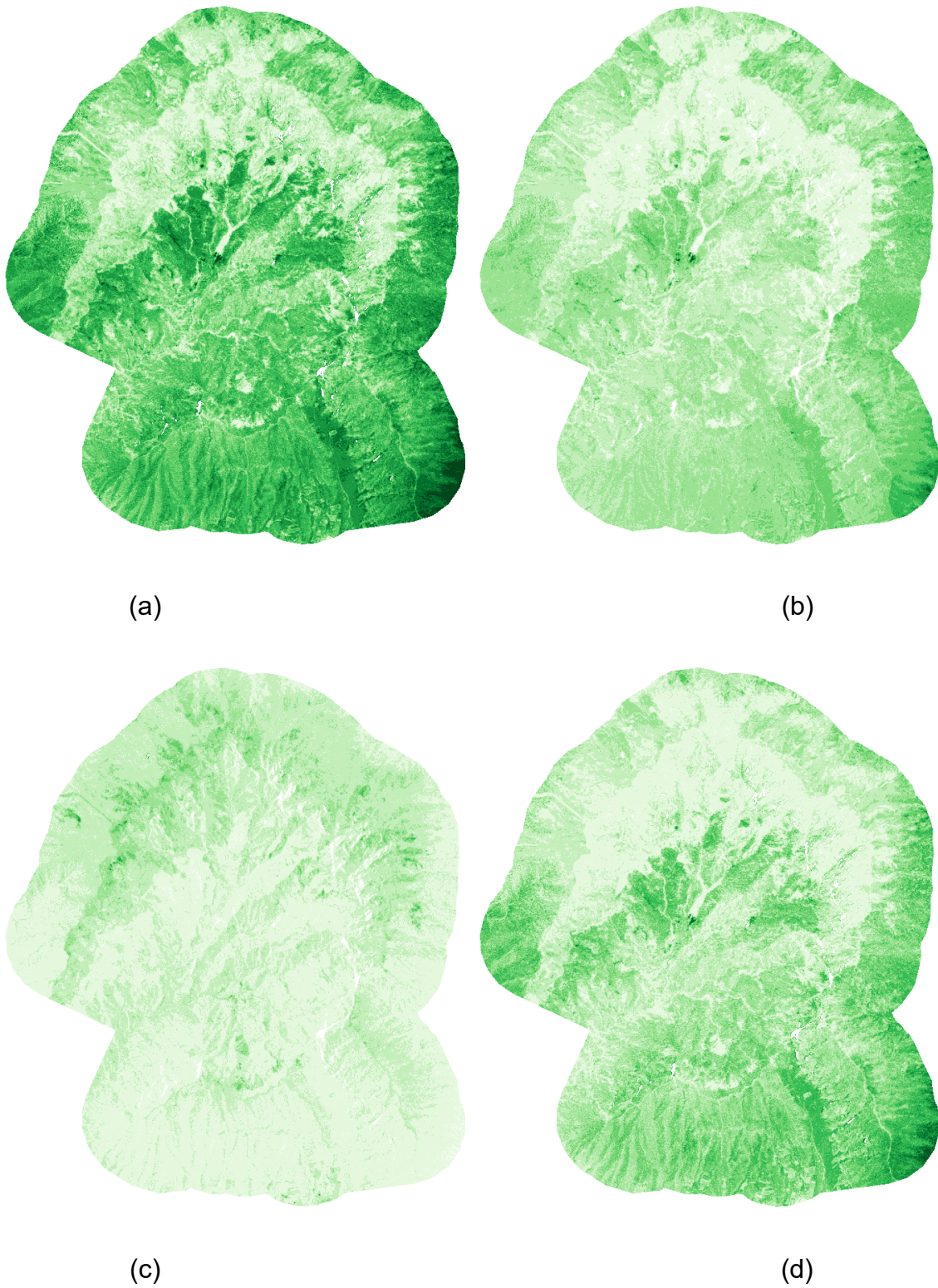


Figura AV.3. Mapas de los índices de vegetación seleccionados para el 28 de junio de 2021: (a) NDVI, (b) SAVI, (c) TCARI y (d) RENDVI.

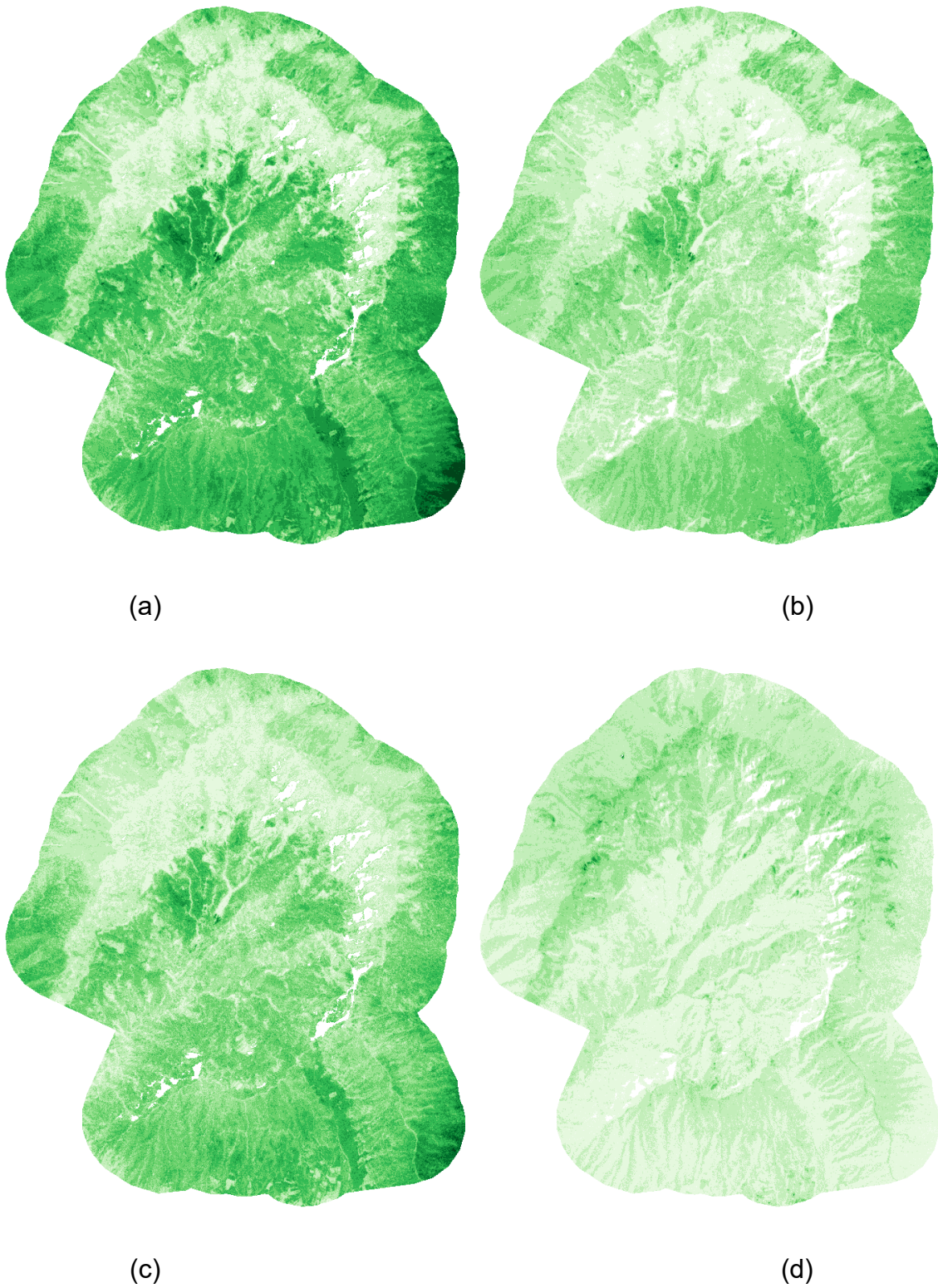


Figura AV.4. Mapas de los índices de vegetación seleccionados para el 11 de septiembre de 2021: (a) NDVI, (b) SAVI, (c) TCARI y (d) RENDVI.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura AV.5. Mapas de los índices de vegetación seleccionados para el 11 de enero de 2022: (a) NDVI, (b) SAVI, (c) TCARI y (d) RENDVI.

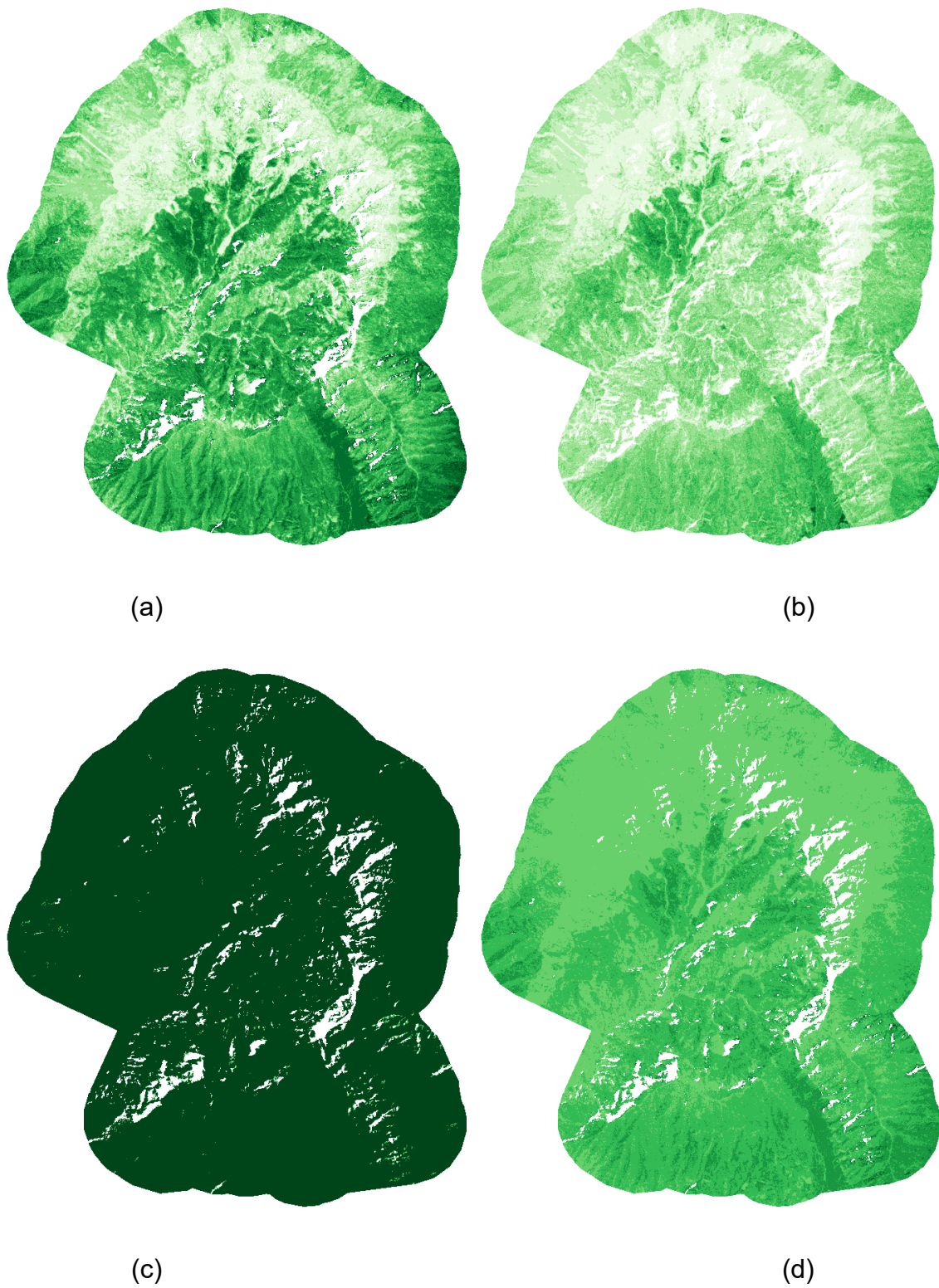


Figura AV.6. Mapas de los índices de vegetación seleccionados para el 9 de abril de 2022: (a) NDVI, (b) SAVI, (c) TCARI y (d) RENDVI.

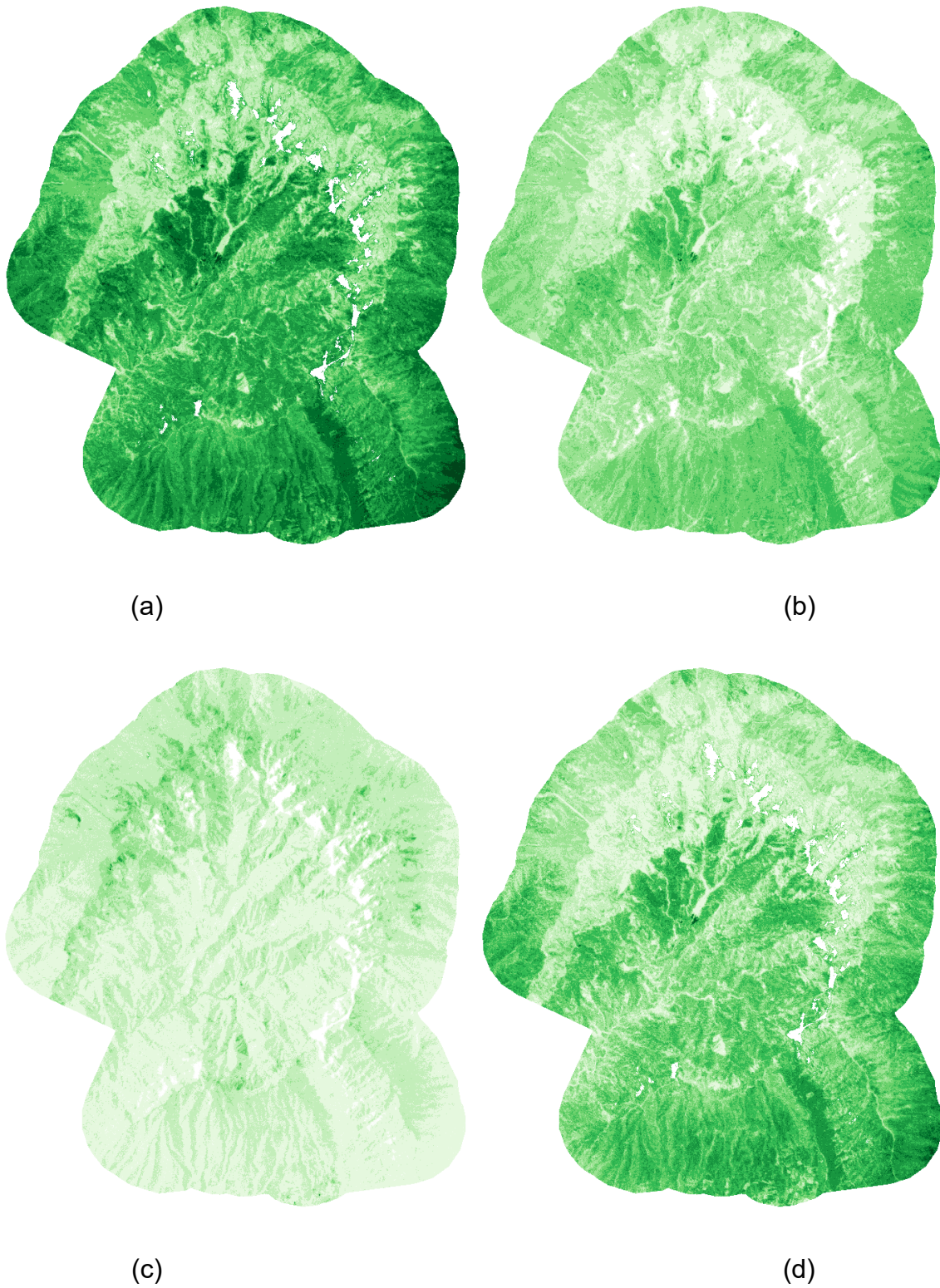


Figura AV.7. Mapas de los índices de vegetación seleccionados para el 17 de junio de 2022: (a) NDVI, (b) SAVI, (c) TCARI y (d) RENDVI.

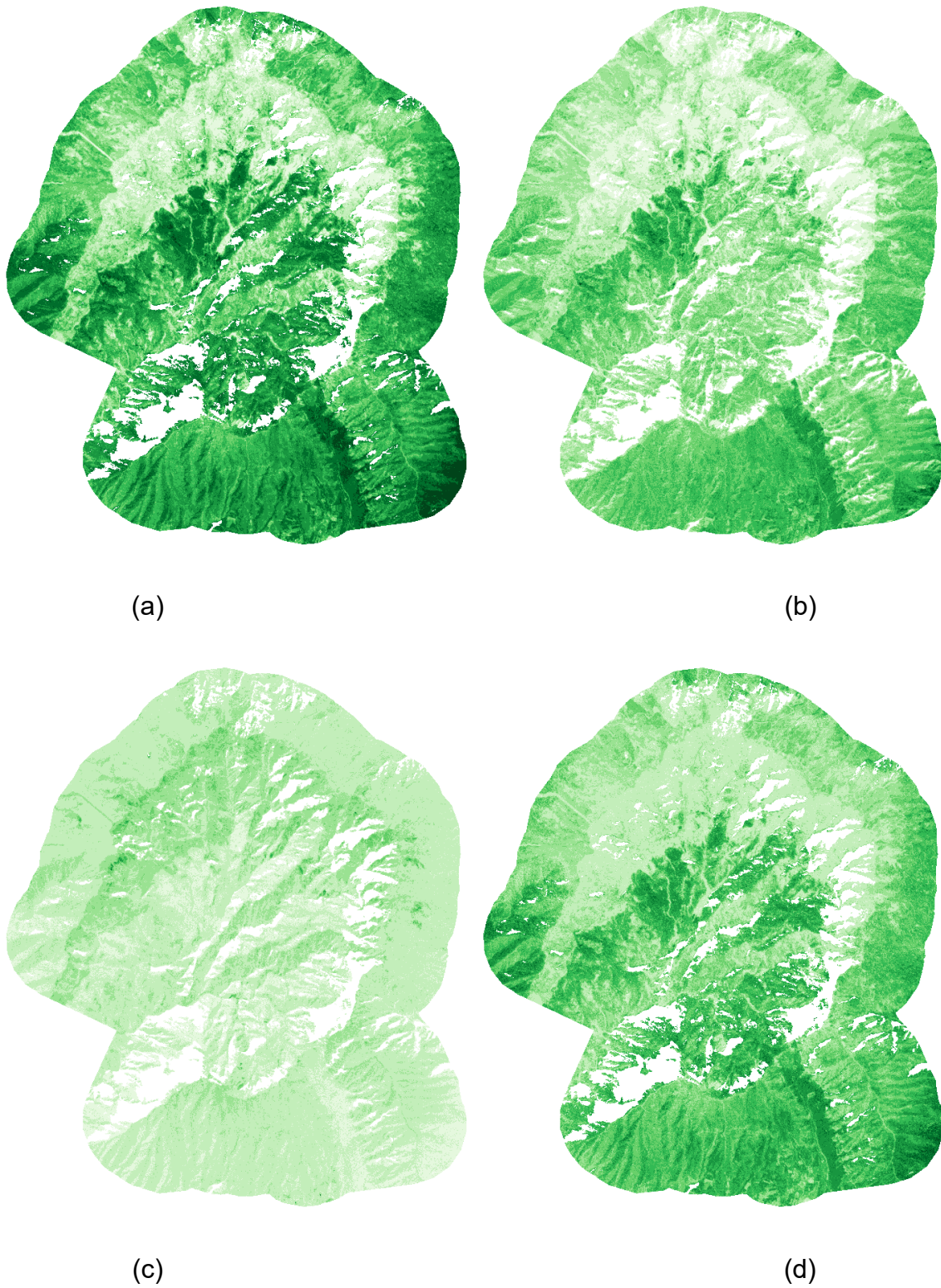


Figura AV.8. Mapas de los índices de vegetación seleccionados para el 18 de octubre de 2022: (a) NDVI, (b) SAVI, (c) TCARI y (d) RENDVI.

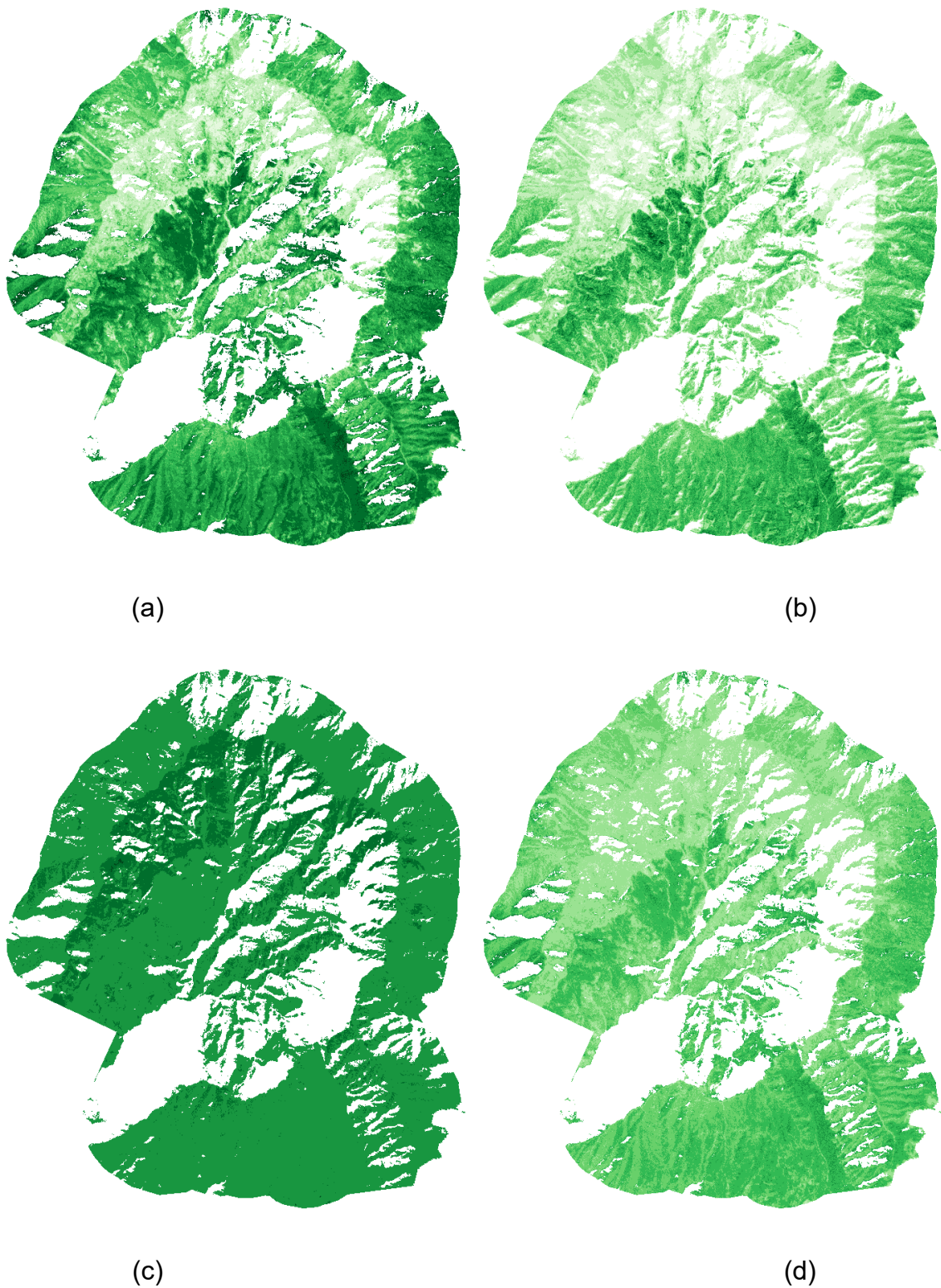


Figura AV.9. Mapas de los índices de vegetación seleccionados para el 7 de enero de 2023: (a) NDVI, (b) SAVI, (c) TCARI y (d) RENDVI.

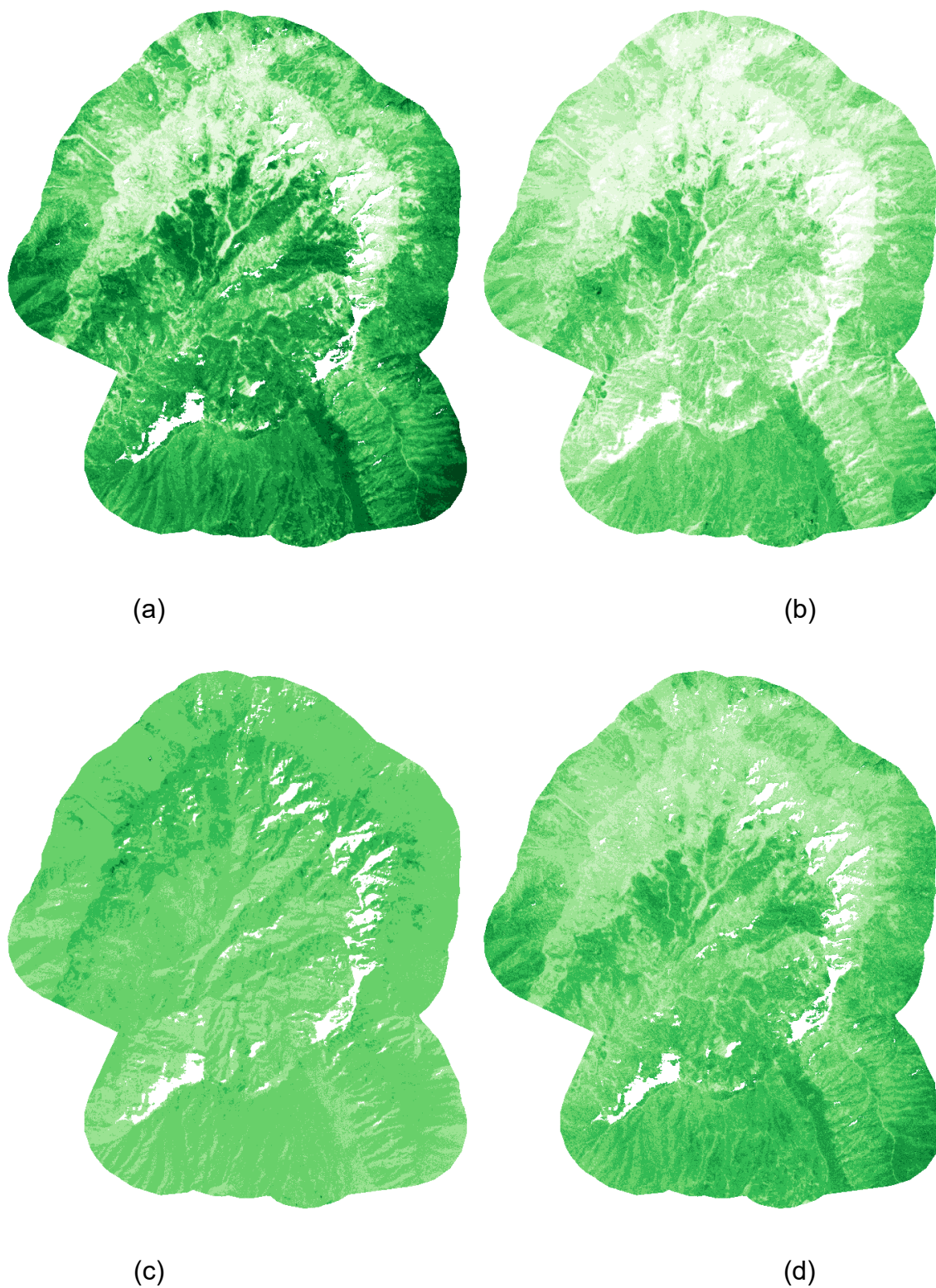


Figura AV.10. Mapas de los índices de vegetación seleccionados para el 24 de marzo de 2023: (a) NDVI, (b) SAVI, (c) TCARI y (d) RENDVI.

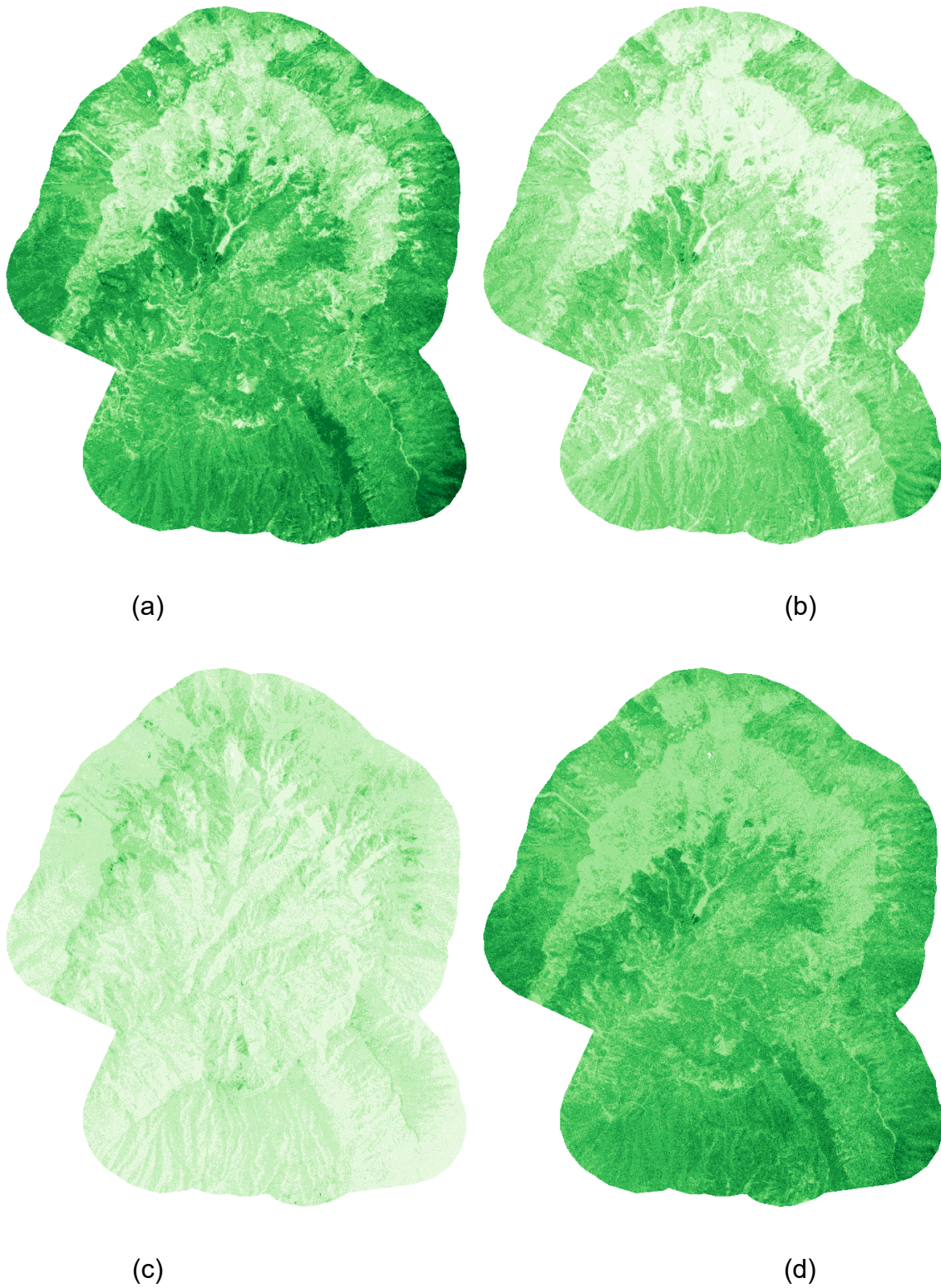


Figura AV.11. Mapas de los índices de vegetación seleccionados para el 29 de junio de 2023: (a) NDVI, (b) SAVI, (c) TCARI y (d) RENDVI.

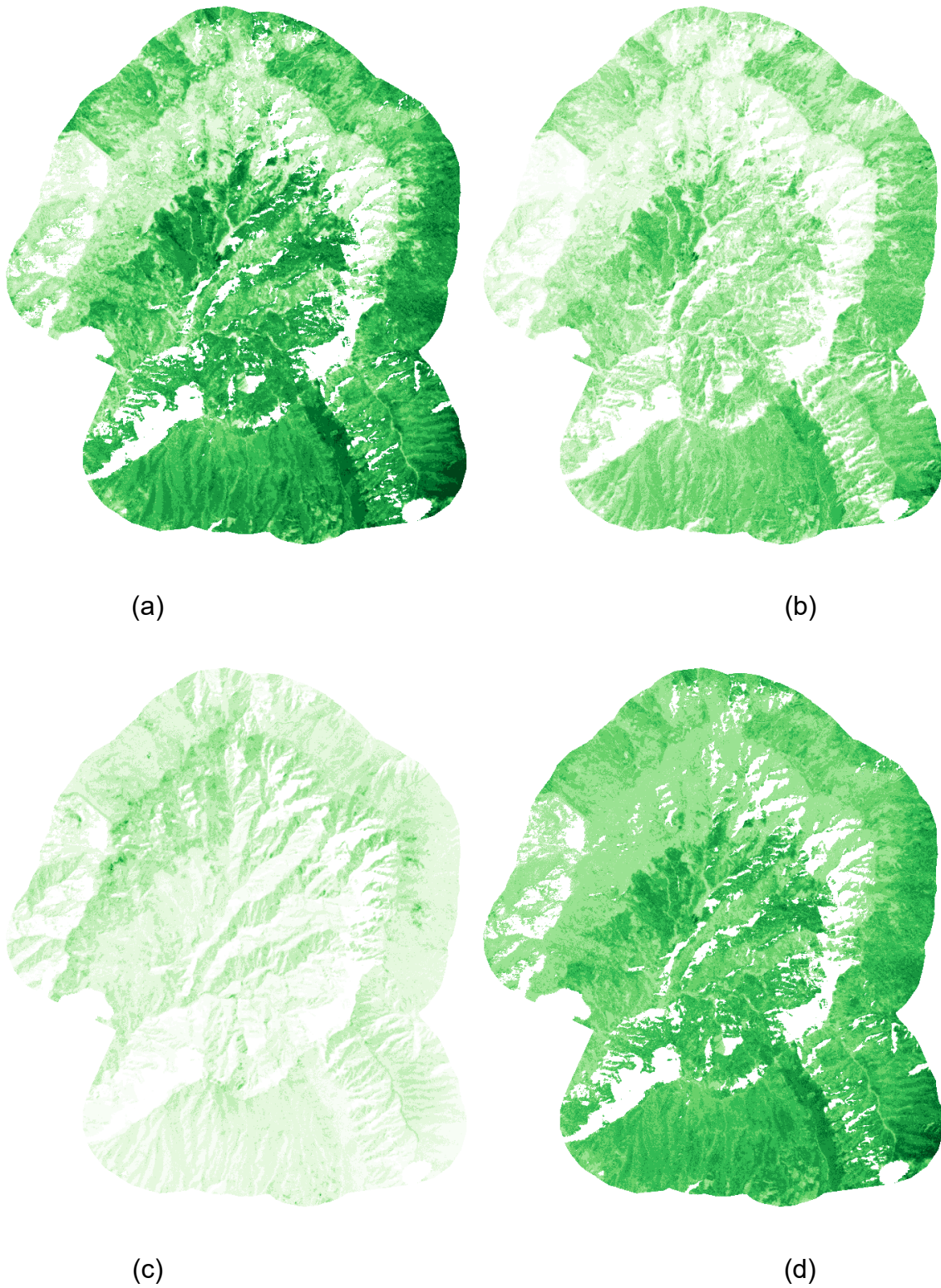


Figura AV.12. Mapas de los índices de vegetación seleccionados para el 27 de septiembre de 2023: (a) NDVI, (b) SAVI, (c) TCARI y (d) RENDVI.

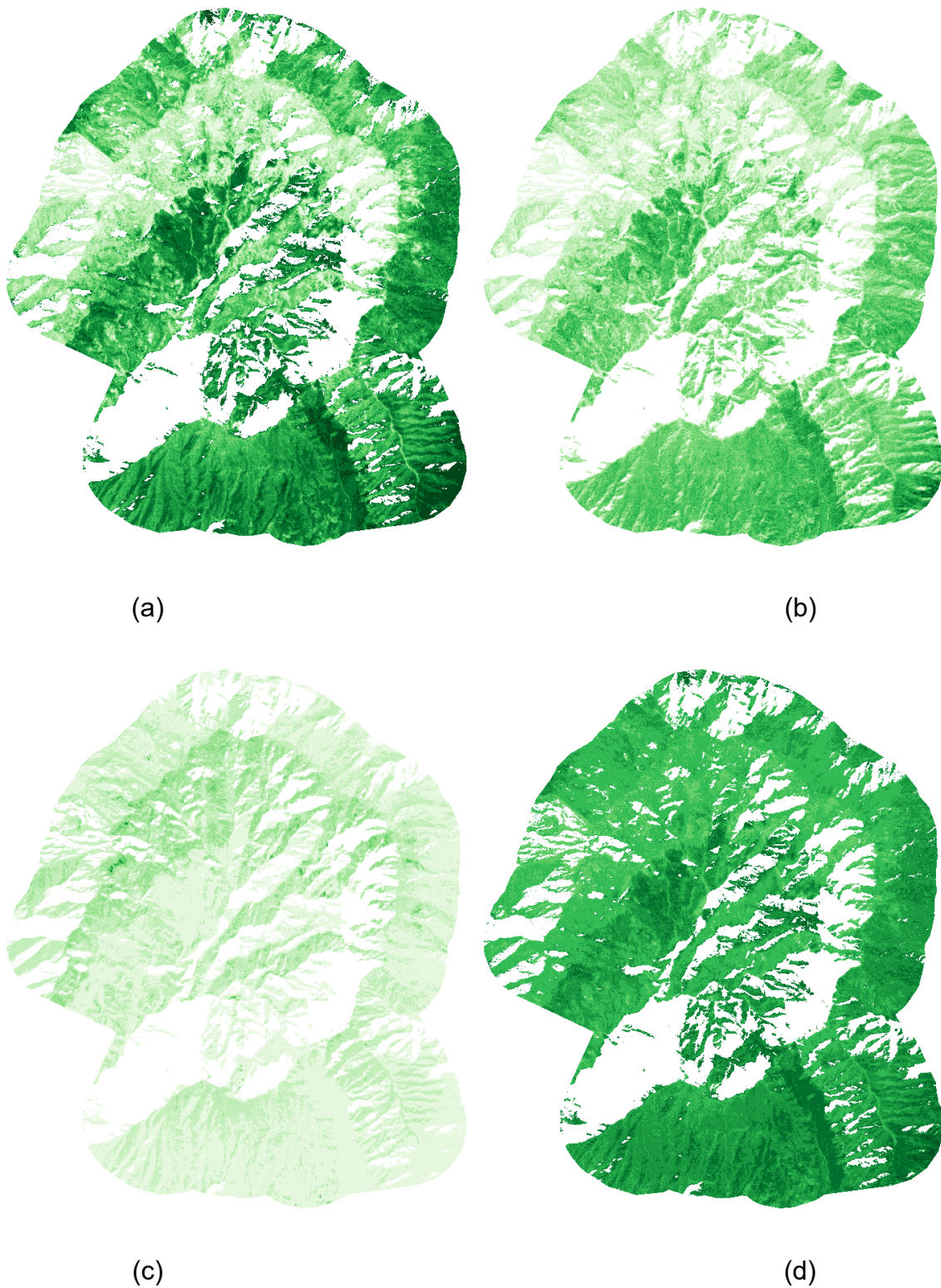


Figura AV.13. Mapas de los índices de vegetación seleccionados para el 7 de enero de 2024: (a) NDVI, (b) SAVI, (c) TCARI y (d) RENDVI.

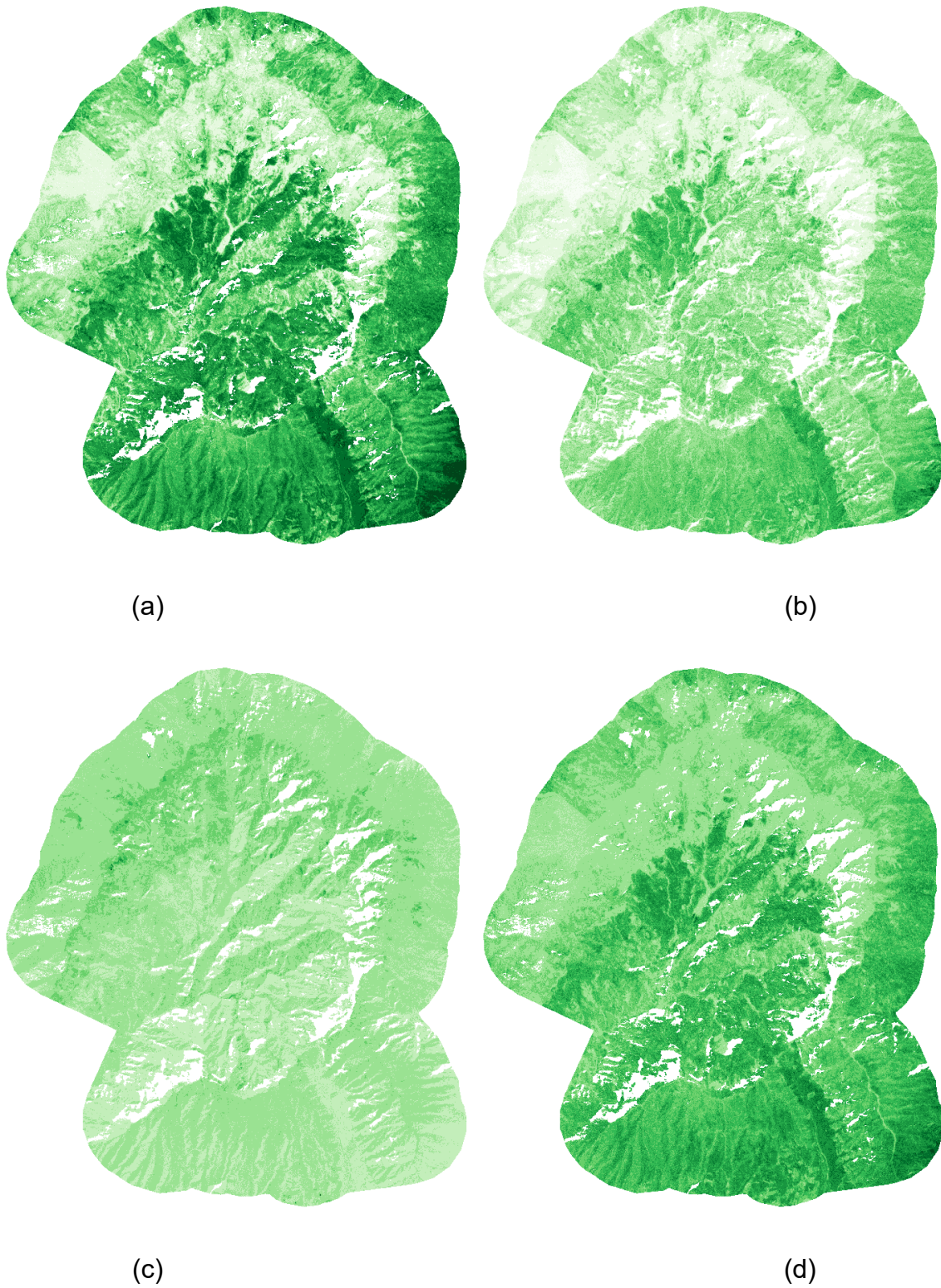


Figura AV.14. Mapas de los índices de vegetación seleccionados para el 16 de marzo de 2024: (a) NDVI, (b) SAVI, (c) TCARI y (d) RENDVI.

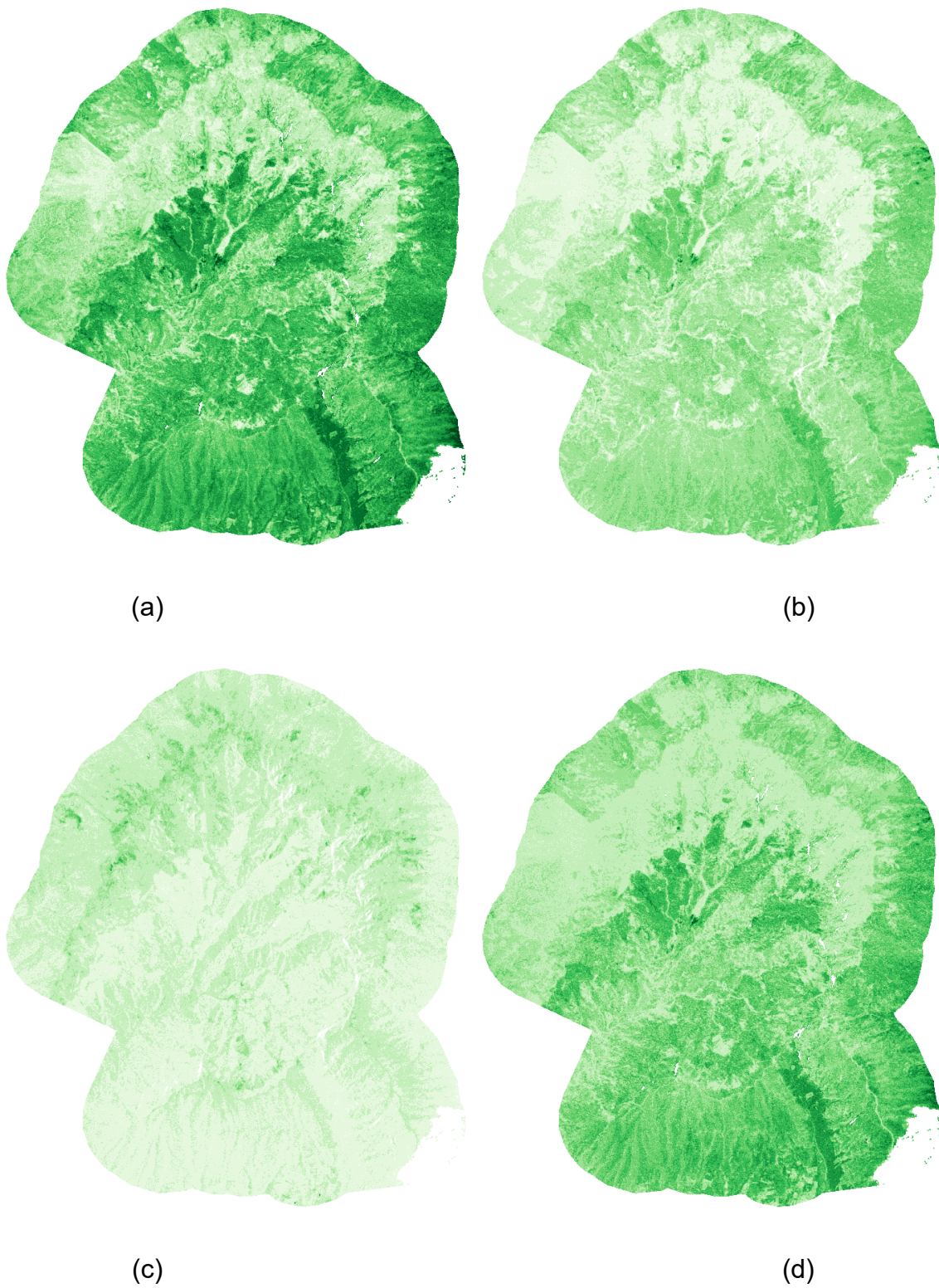


Figura AV.15. Mapas de los índices de vegetación seleccionados para el 15 de junio de 2024: (a) NDVI, (b) SAVI, (c) TCARI y (d) RENDVI.

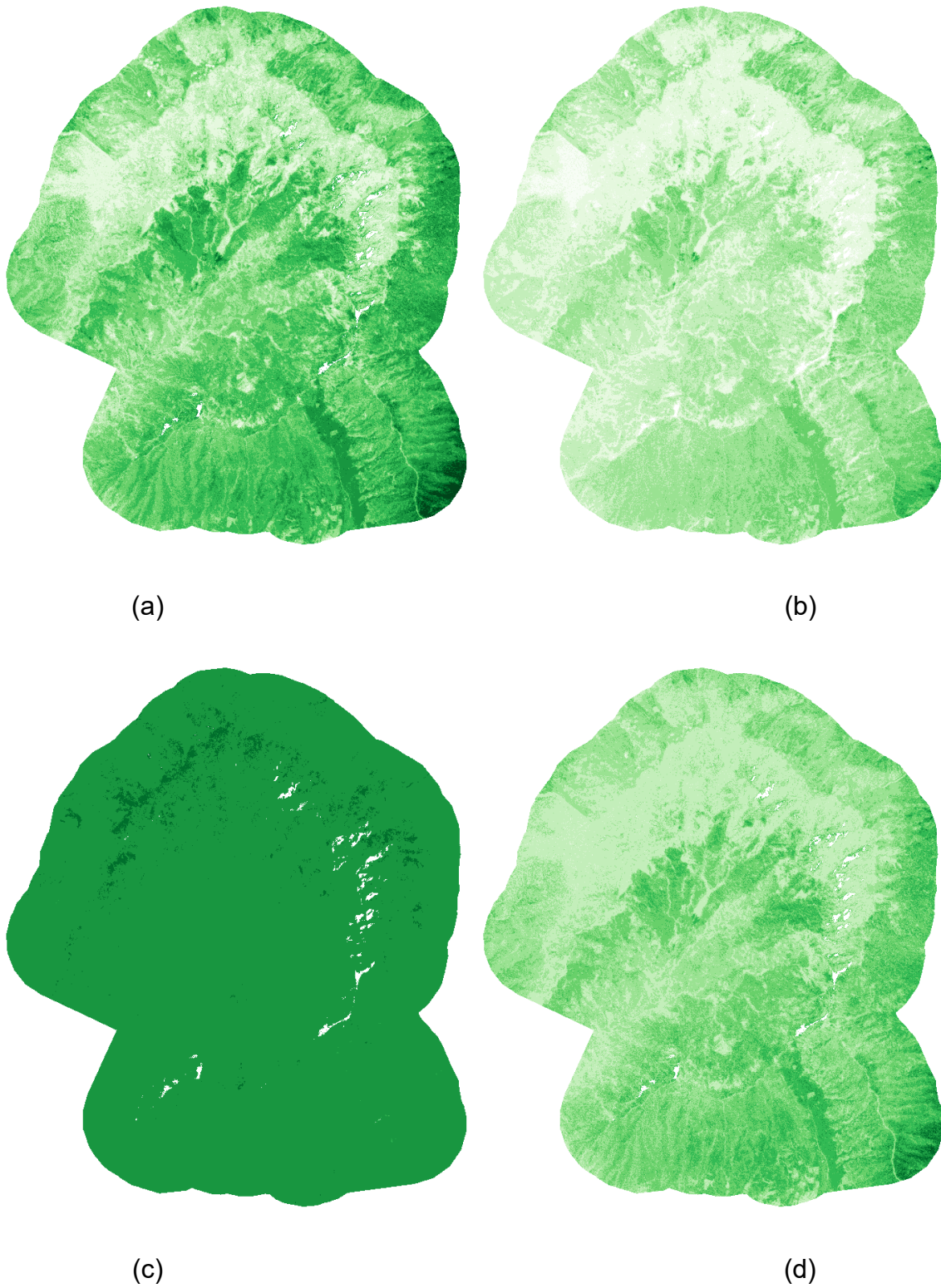


Figura AV.16. Mapas de los índices de vegetación seleccionados para el 28 de agosto de 2024: (a) NDVI, (b) SAVI, (c) TCARI y (d) RENDVI.

ANEXO VI. Gráficas de evolución temporal

Presenta las gráficas elaboradas a partir de los datos extraídos, mostrando la evolución de los índices de vegetación a lo largo del tiempo, lo que permite identificar tendencias de cobertura vegetal.

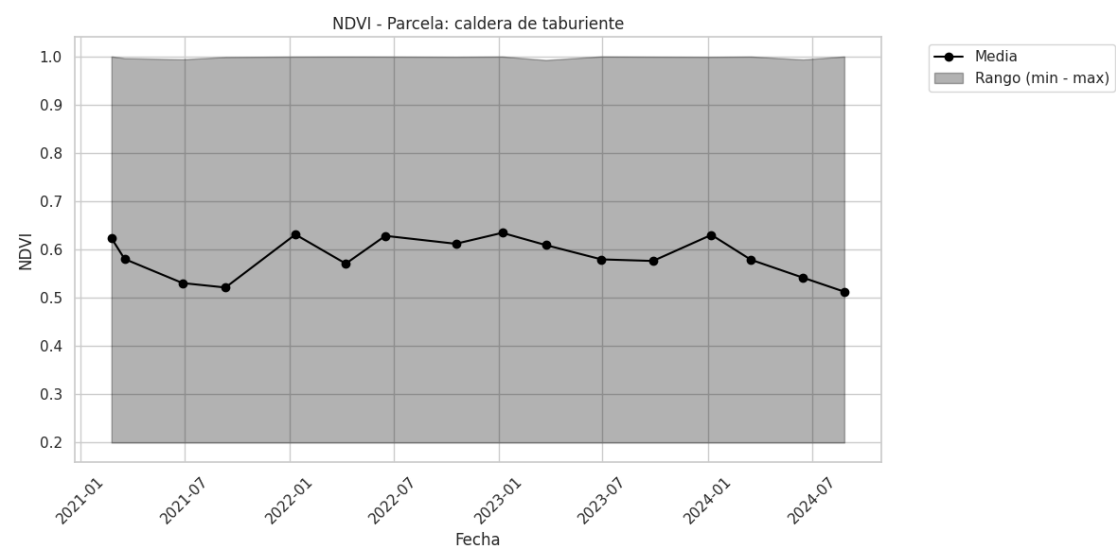


Figura AVI.1 NDVI calculado para la parcela de La Caldera de Taburiente, mostrando la media y el rango completo de valores (mínimo–máximo) en cada fecha.

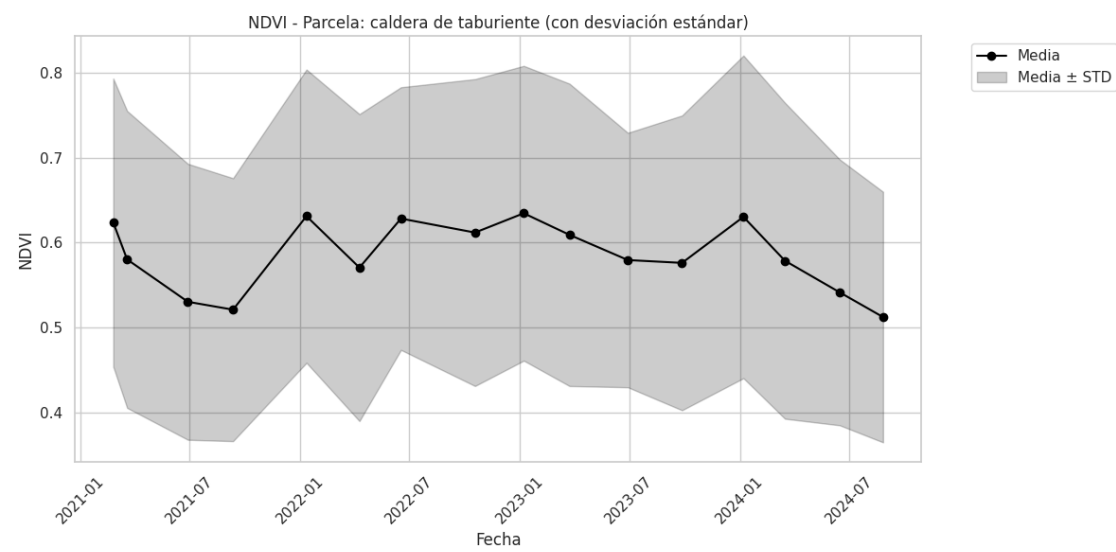


Figura AVI.2 NDVI calculado para la parcela de La Caldera de Taburiente, mostrando la media y la variabilidad interna mediante la desviación estándar.

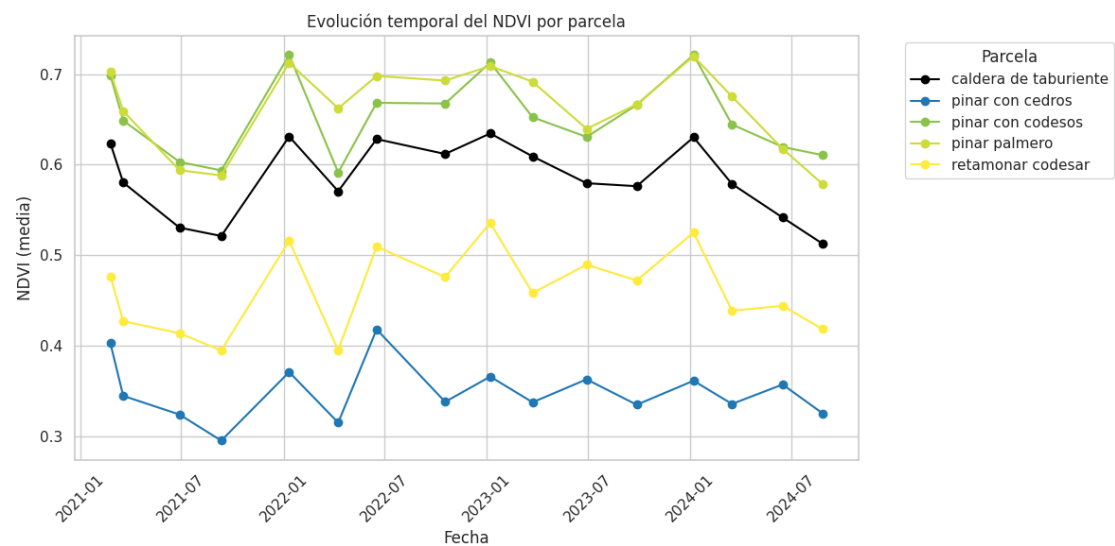


Figura AVI.3 NDVI calculado para cada parcela. Evolución temporal.

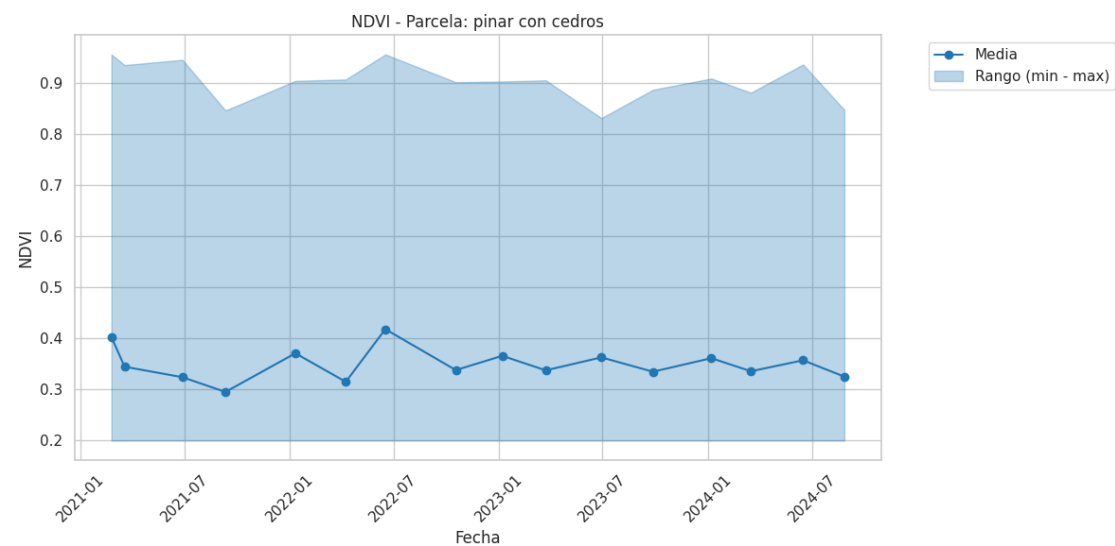


Figura AVI.4 NDVI calculado para la parcela de Pinar con Cedros, mostrando la media y el rango completo de valores (mínimo-máximo) en cada fecha.

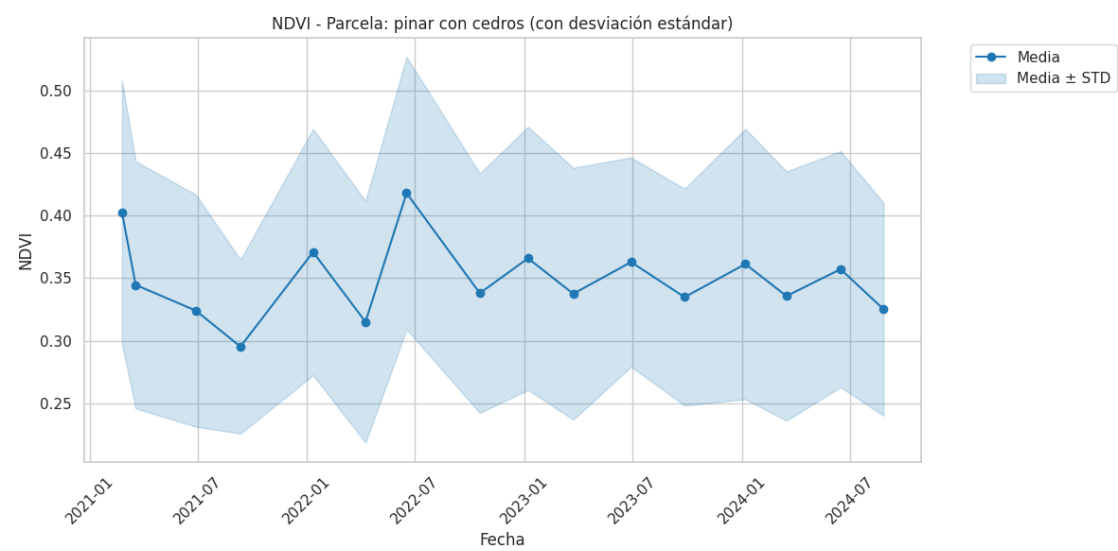


Figura AVI.5 NDVI calculado para la parcela Pinar con Cedros, mostrando la media y la variabilidad interna mediante la desviación estándar.

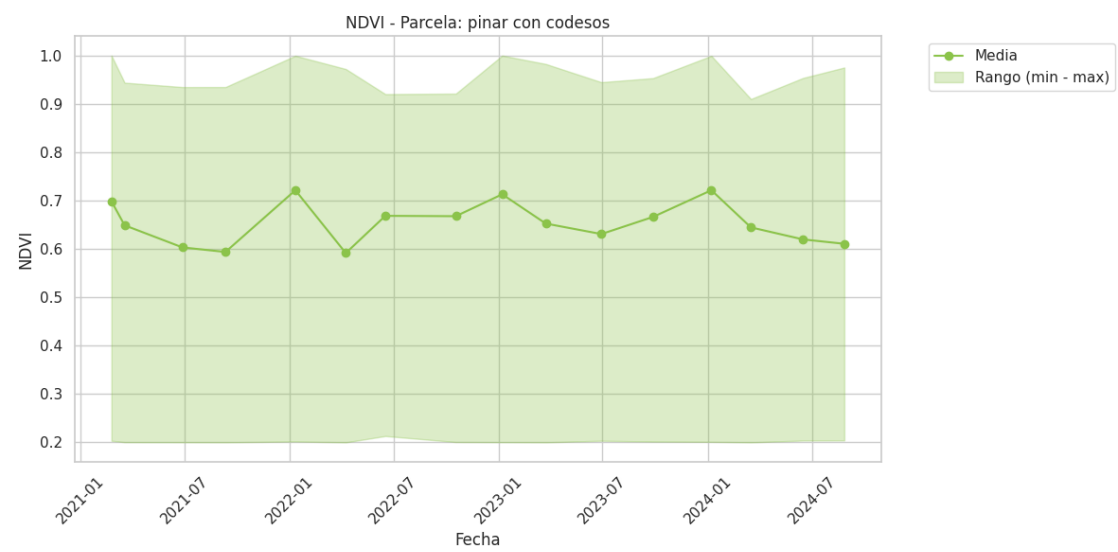


Figura AVI.6 NDVI calculado para la parcela de Pinar con Codesos, mostrando la media y el rango completo de valores (mínimo–máximo) en cada fecha.

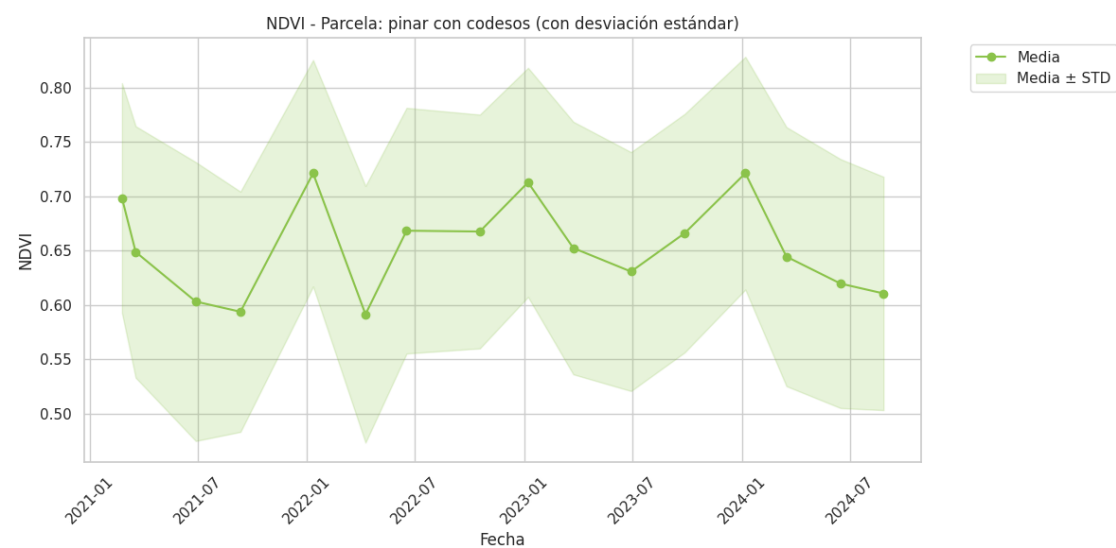


Figura AVI.7 NDVI calculado para la parcela Pinar con Codesos, mostrando la media y la variabilidad interna mediante la desviación estándar.

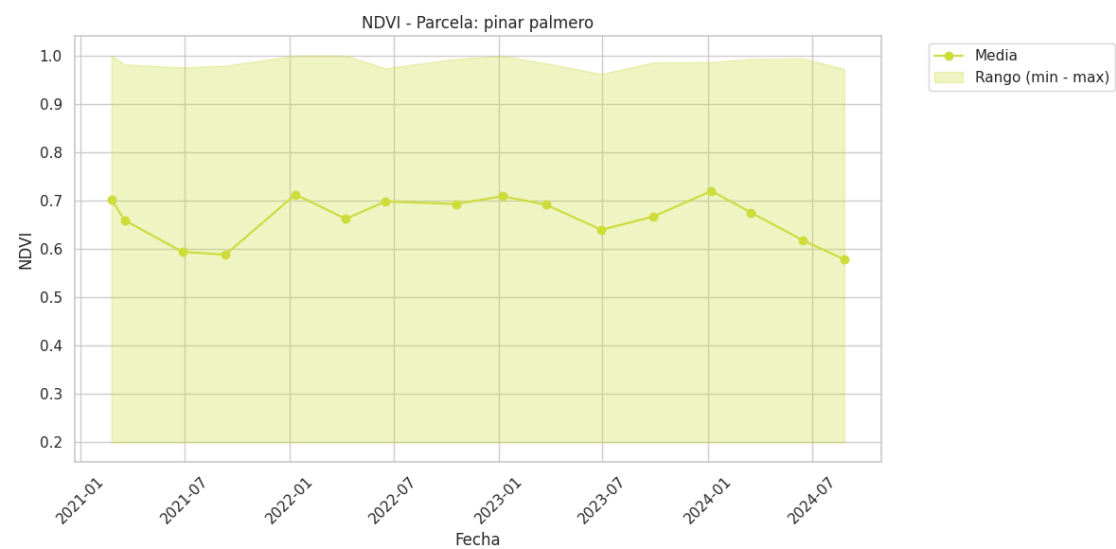


Figura AVI.8 NDVI calculado para la parcela de Pinar Palmero, mostrando la media y el rango completo de valores (mínimo–máximo) en cada fecha.

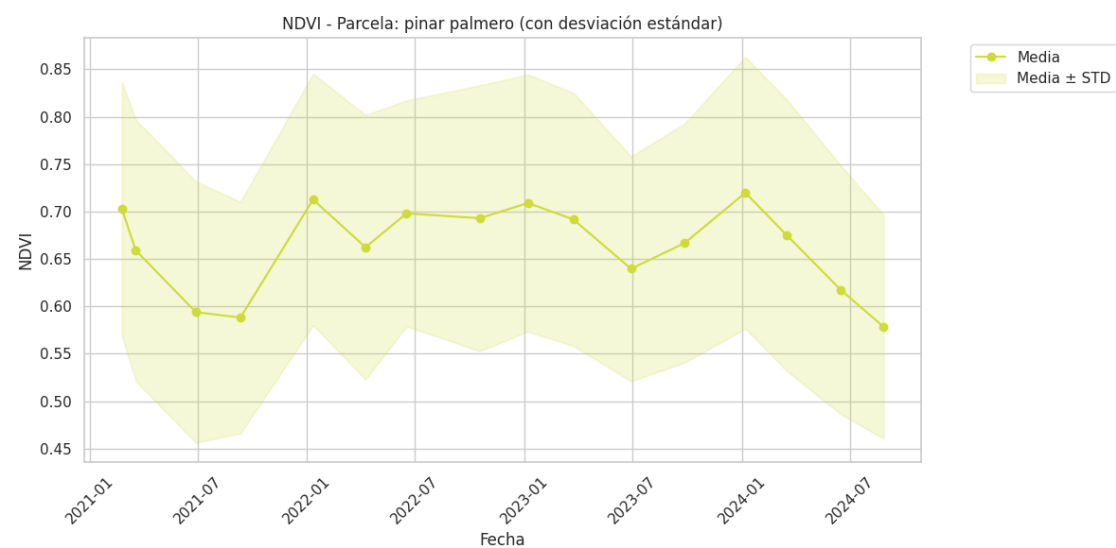


Figura AVI.9 NDVI calculado para la parcela Pinar Palmero, mostrando la media y la variabilidad interna mediante la desviación estándar.

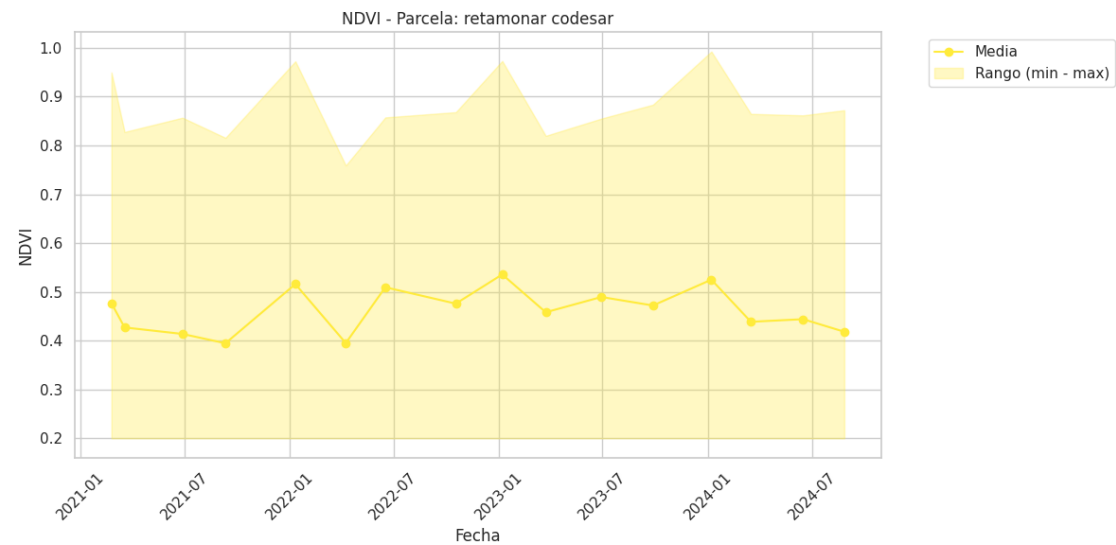


Figura AVI.10 NDVI calculado para la parcela de Retamonar Codesar, mostrando la media y el rango completo de valores (mínimo–máximo) en cada fecha.

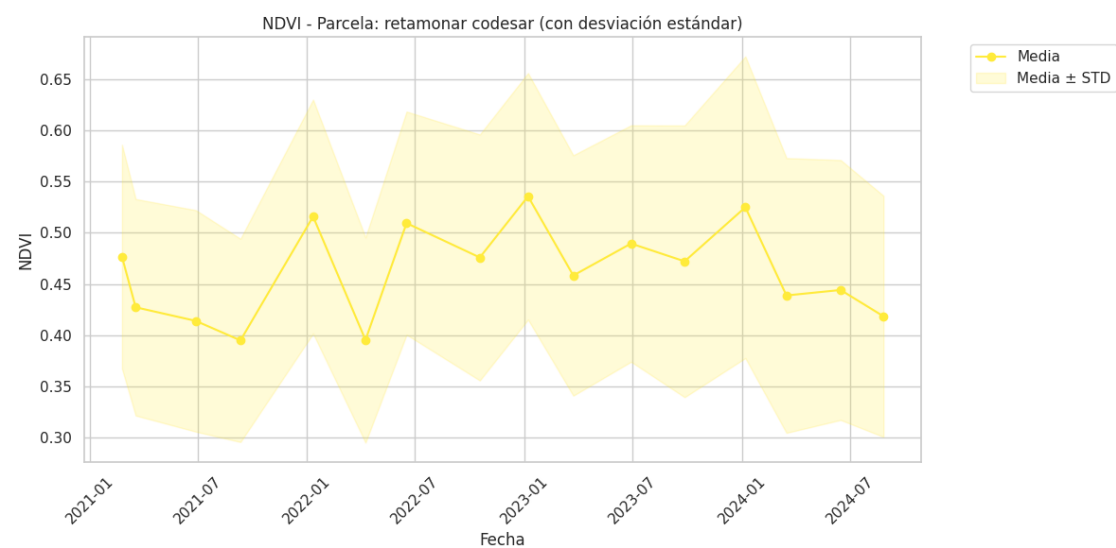


Figura AVI.11 NDVI calculado para la parcela Retamonar Codesar, mostrando la media y la variabilidad interna mediante la desviación estándar.

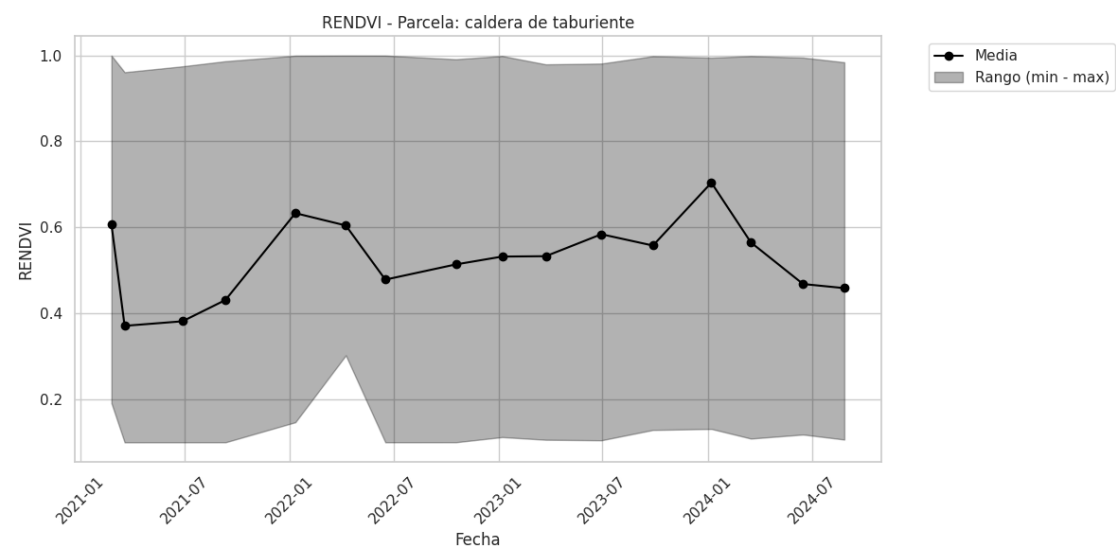


Figura AVI.12 RENDVI calculado para la parcela de La Caldera de Taburiente, mostrando la media y el rango completo de valores (mínimo-máximo) en cada fecha.

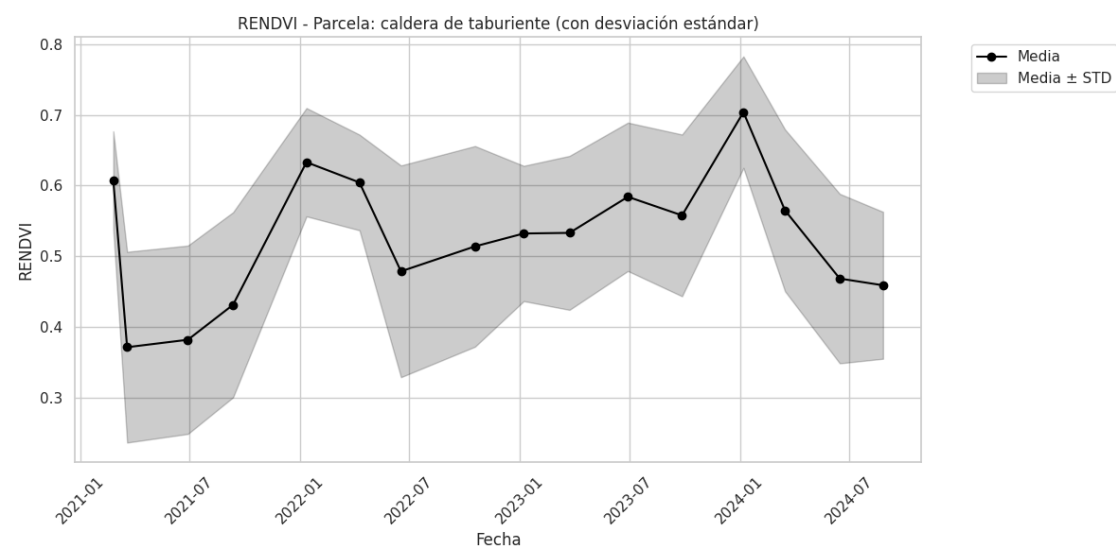


Figura AVI.13 RENDVI calculado para la parcela de La Caldera de Taburiente, mostrando la media y la variabilidad interna mediante la desviación estándar.

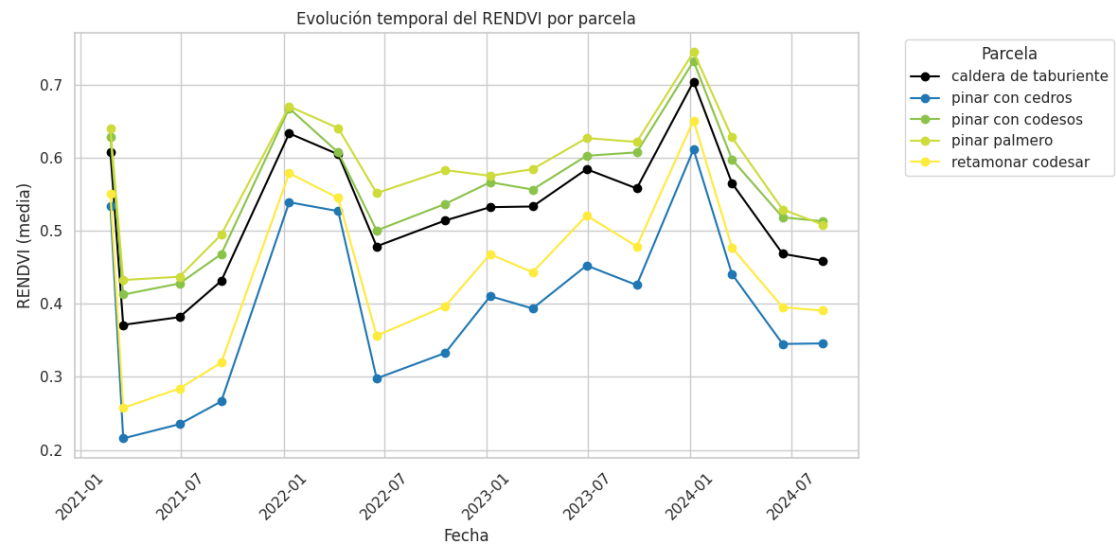


Figura AVI.14 RENDVI calculado para cada parcela. Evolución temporal.

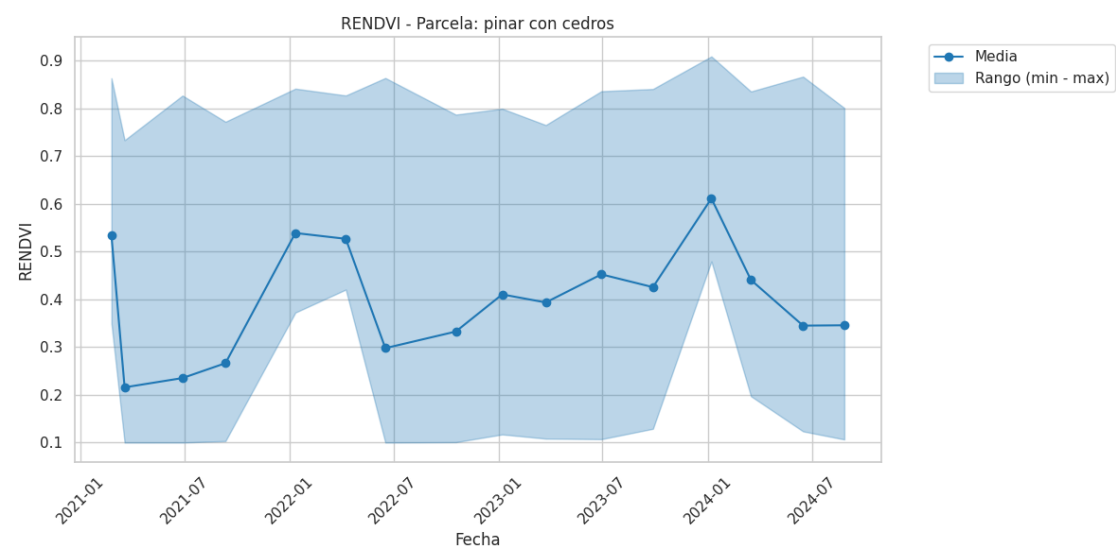


Figura AVI.15 RENDVI calculado para la parcela de Pinar con Cedros, mostrando la media y el rango completo de valores (mínimo–máximo) en cada fecha.

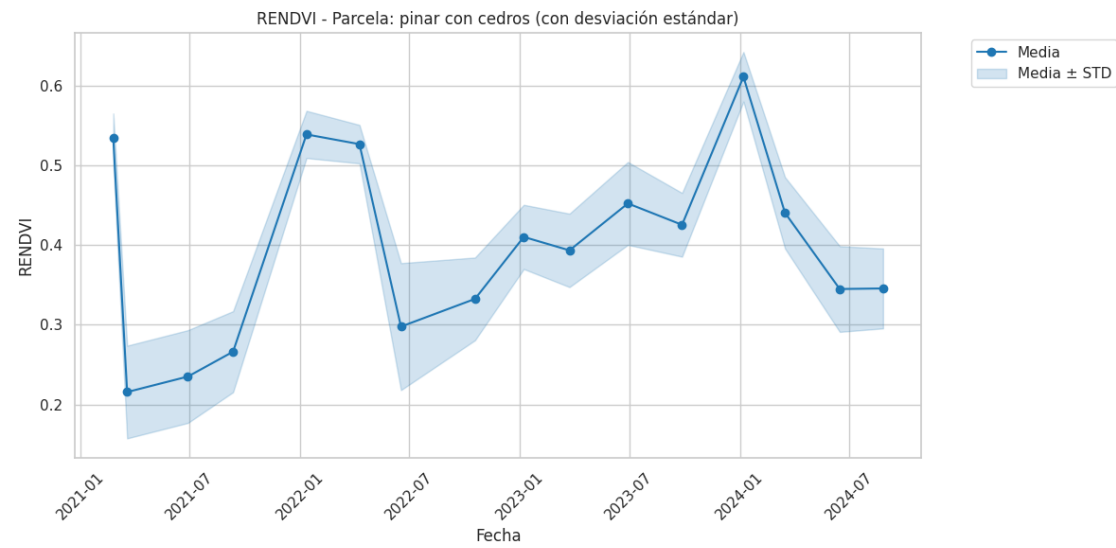


Figura AVI.16 RENDVI calculado para la parcela Pinar con Cedros, mostrando la media y la variabilidad interna mediante la desviación estándar.

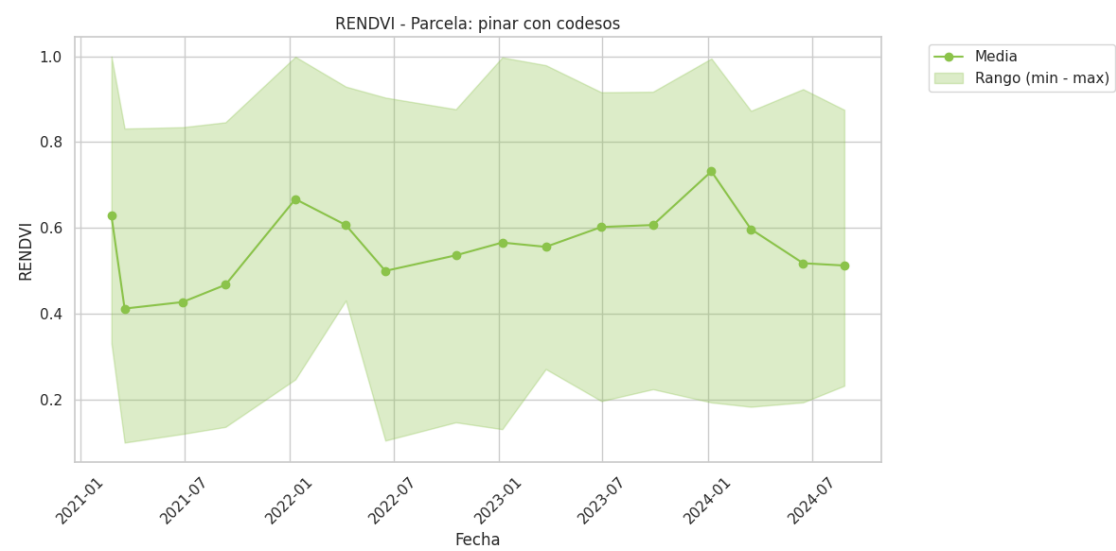


Figura AVI.17 RENDVI calculado para la parcela de Pinar con Codesos, mostrando la media y el rango completo de valores (mínimo–máximo) en cada fecha.

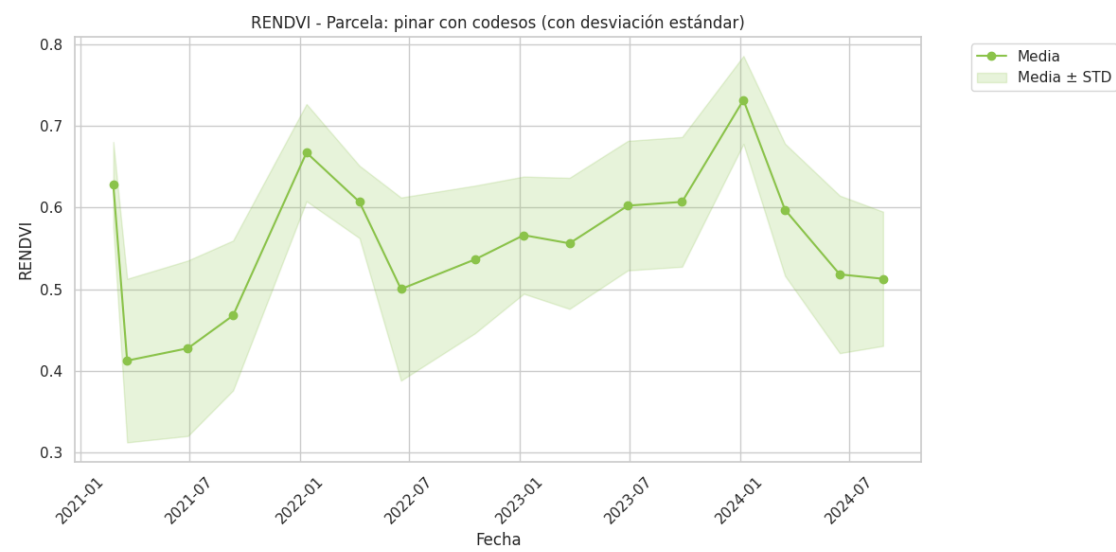


Figura AVI.18 RENDVI calculado para la parcela Pinar con Codesos, mostrando la media y la variabilidad interna mediante la desviación estándar.

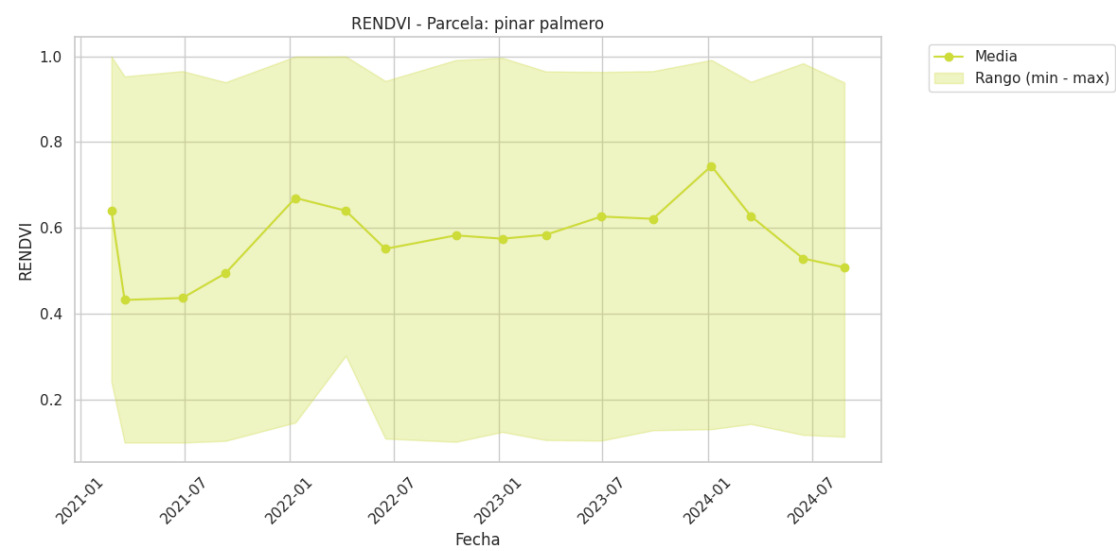


Figura AVI.19 RENDVI calculado para la parcela de Pinar Palmero, mostrando la media y el rango completo de valores (mínimo–máximo) en cada fecha.

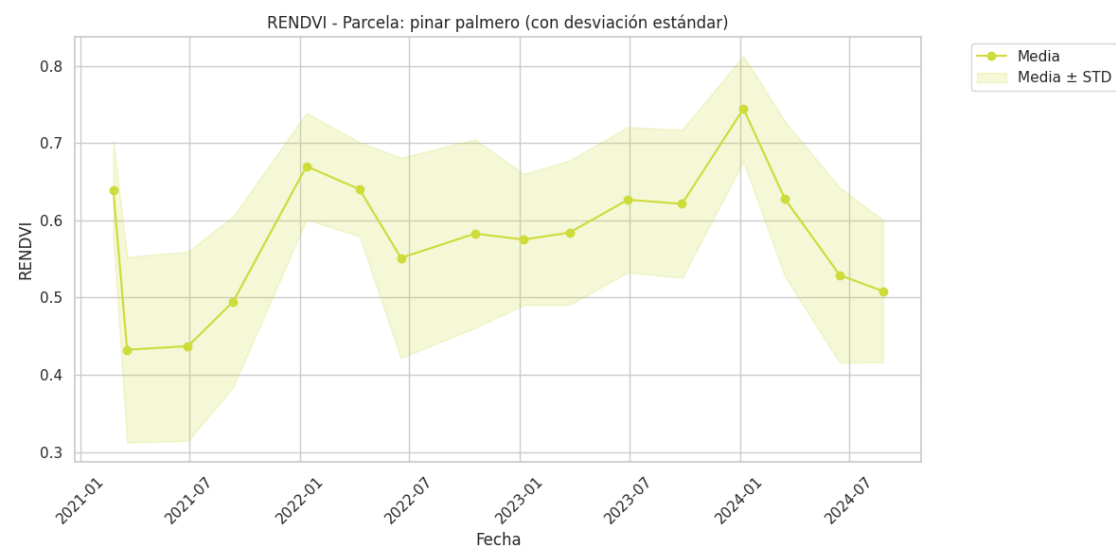


Figura AVI.20 RENDVI calculado para la parcela Pinar Palmero, mostrando la media y la variabilidad interna mediante la desviación estándar.

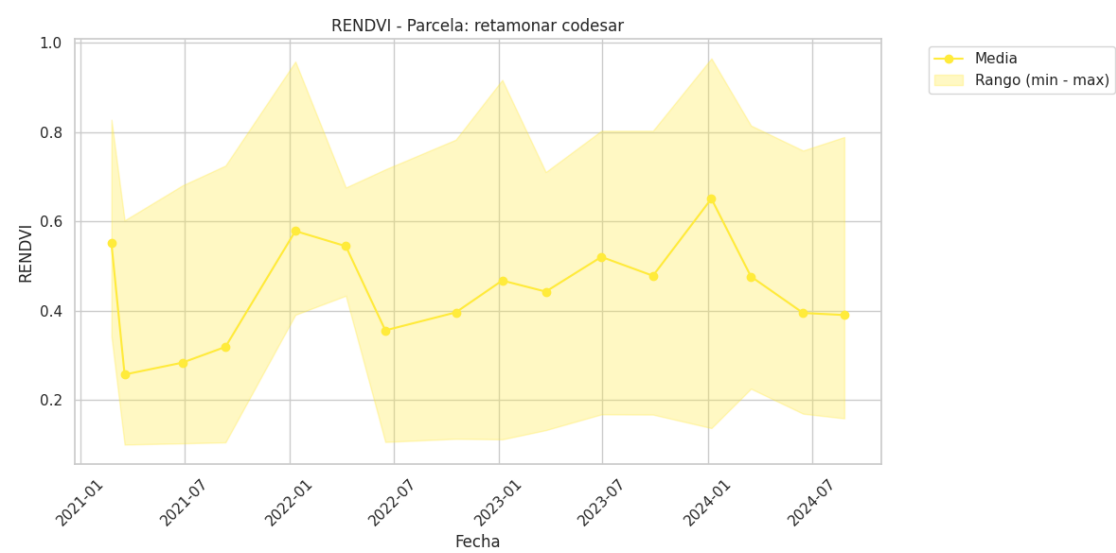


Figura AVI.21 RENDVI calculado para la parcela de Retamonar Codesar, mostrando la media y el rango completo de valores (mínimo–máximo) en cada fecha.

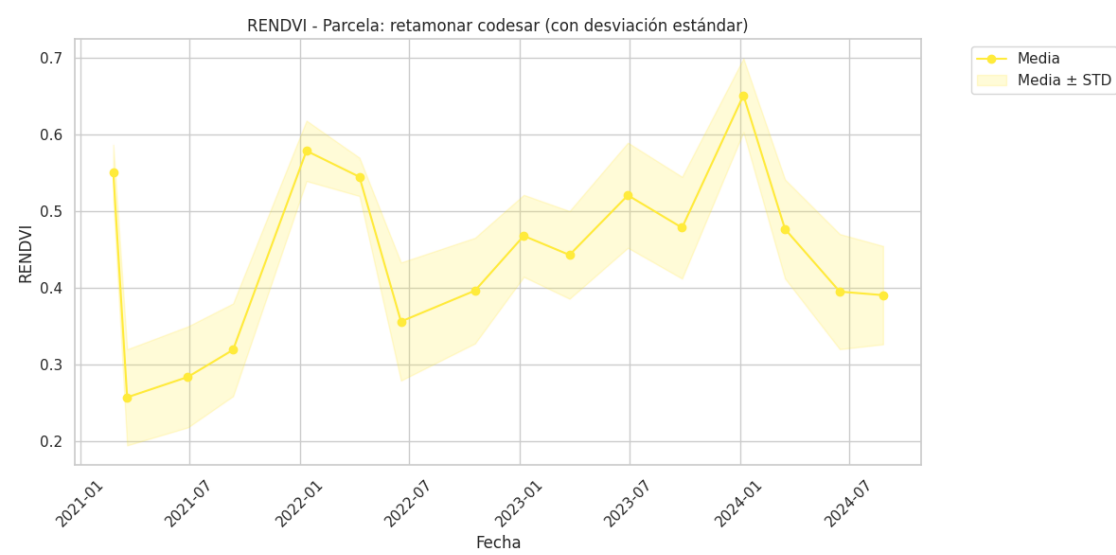


Figura AVI.22 RENDVI calculado para la parcela Retamonar Codesar, mostrando la media y la variabilidad interna mediante la desviación estándar.

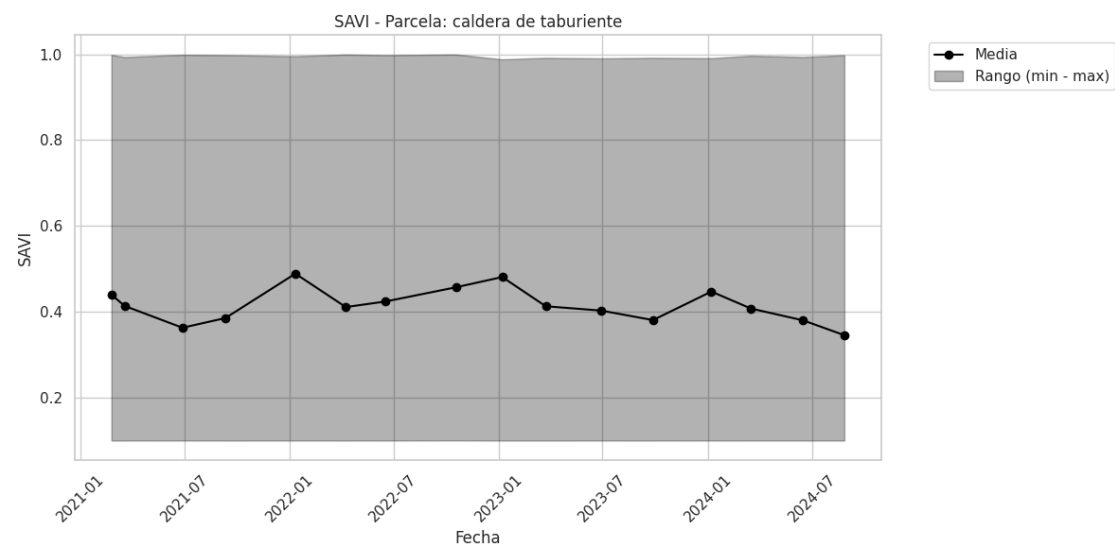


Figura AVI.23 SAVI calculado para la parcela de La Caldera de Taburiente, mostrando la media y el rango completo de valores (mínimo–máximo) en cada fecha.

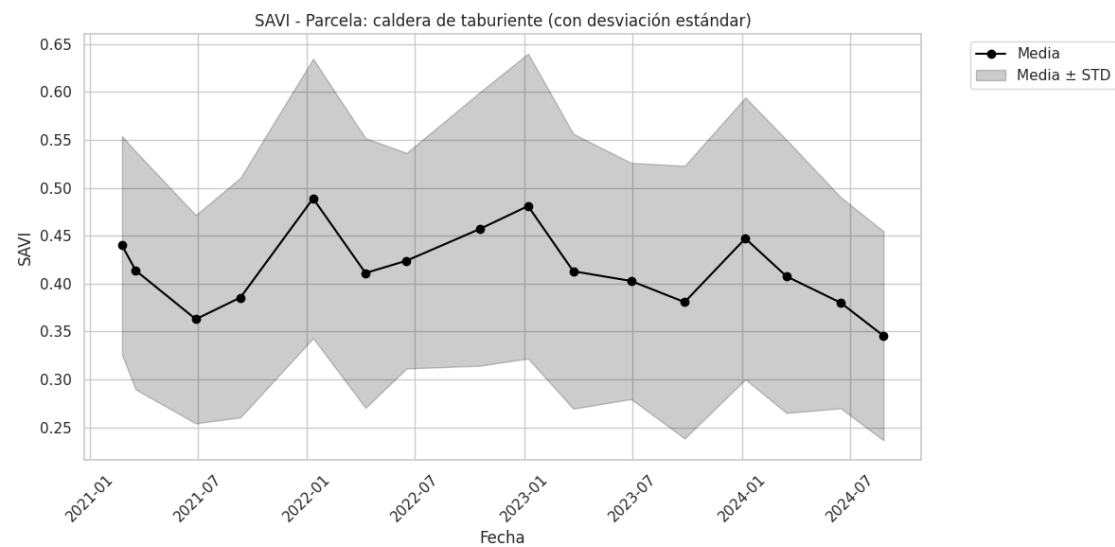


Figura AVI.24 SAVI calculado para la parcela de La Caldera de Taburiente, mostrando la media y la variabilidad interna mediante la desviación estándar.

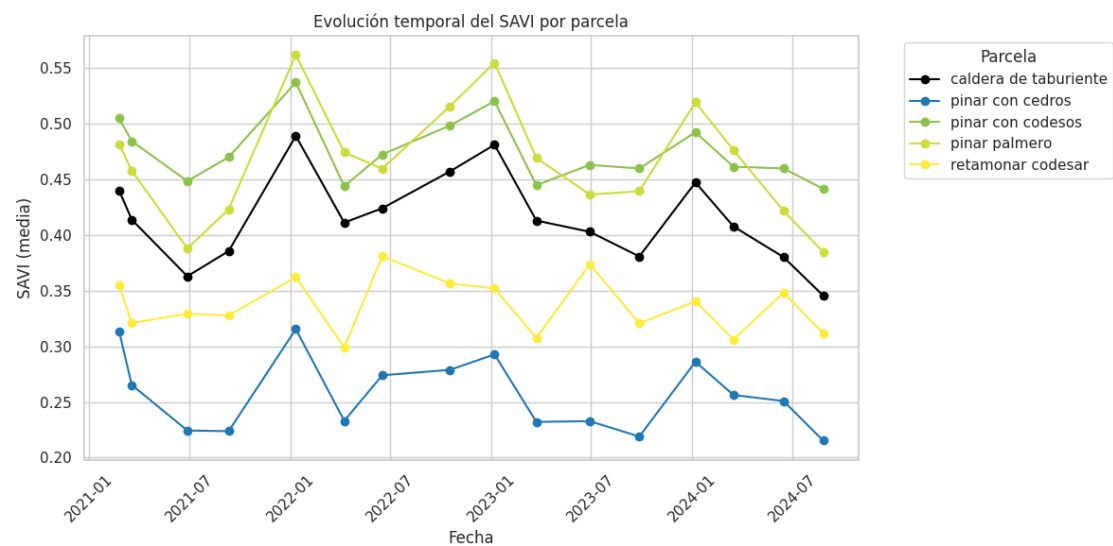


Figura AVI.25 SAVI calculado para cada parcela. Evolución temporal.

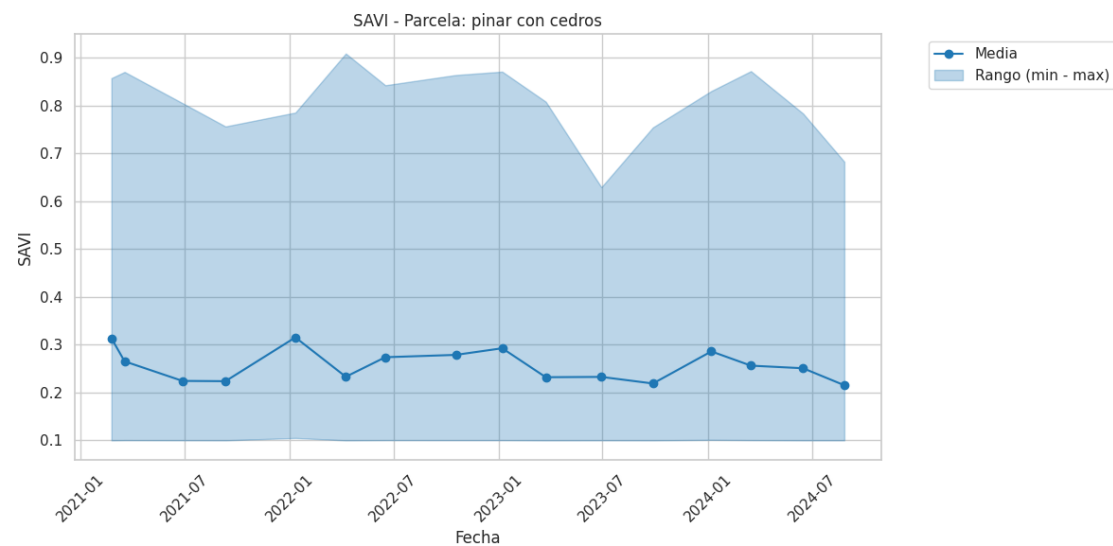


Figura AVI.26 SAVI calculado para la parcela de Pinar con Cedros, mostrando la media y el rango completo de valores (mínimo–máximo) en cada fecha.

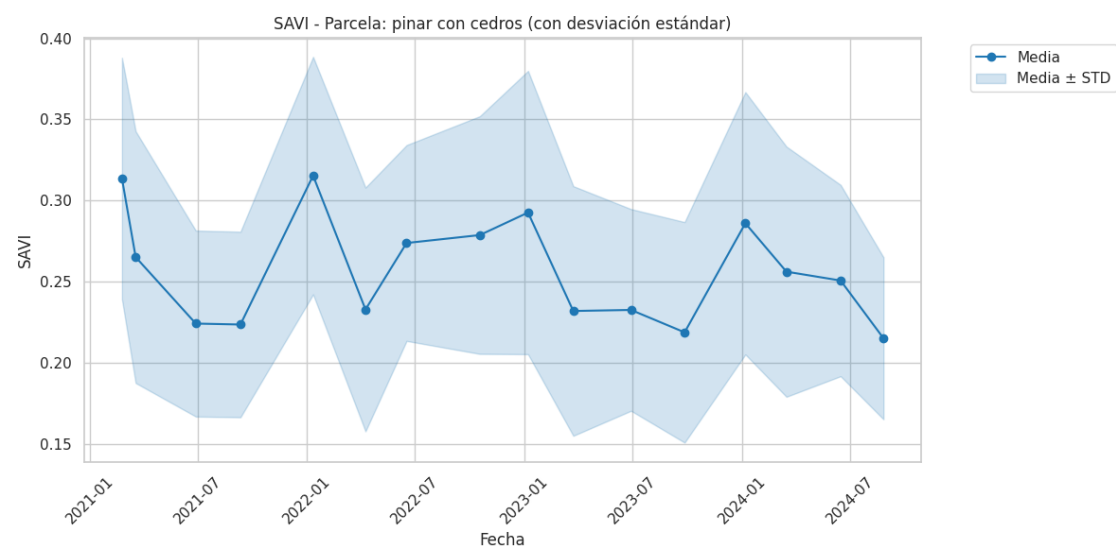


Figura AVI.27 SAVI calculado para la parcela Pinar con Cedros, mostrando la media y la variabilidad interna mediante la desviación estándar.

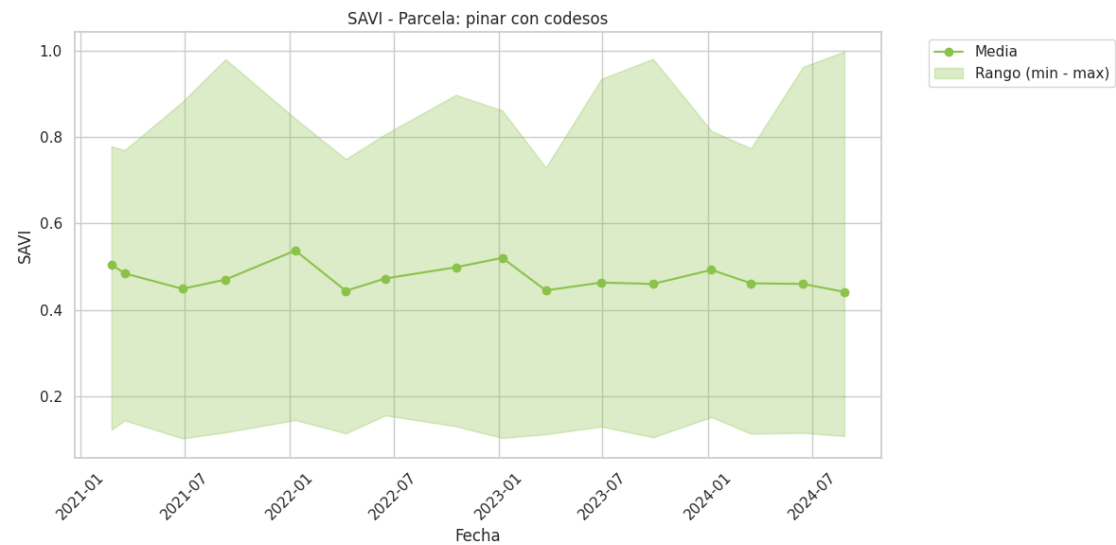


Figura AVI.28 SAVI calculado para la parcela de Pinar con Codesos, mostrando la media y el rango completo de valores (mínimo–máximo) en cada fecha.

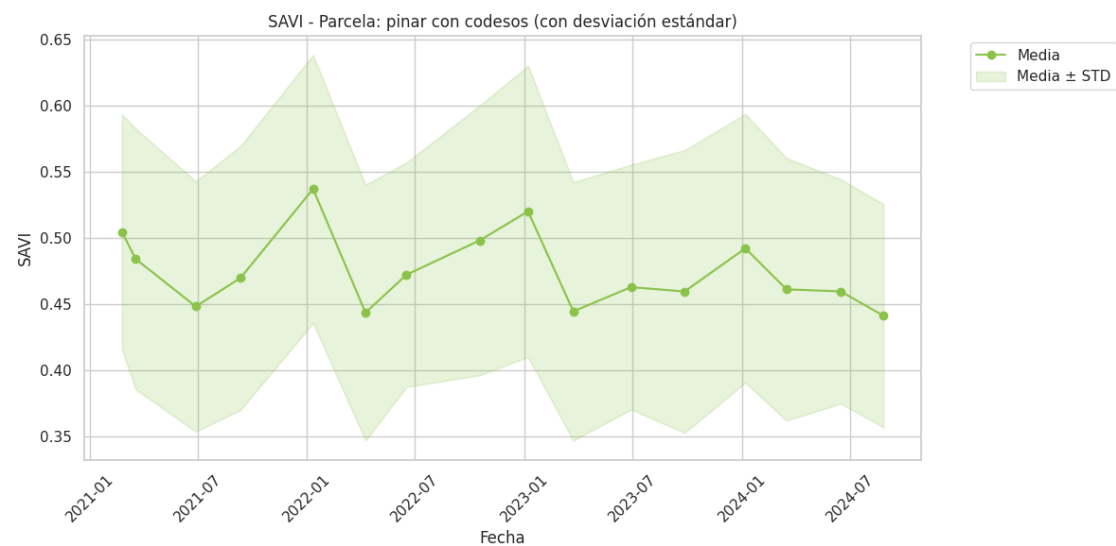


Figura AVI.29 SAVI calculado para la parcela Pinar con Codesos, mostrando la media y la variabilidad interna mediante la desviación estándar.

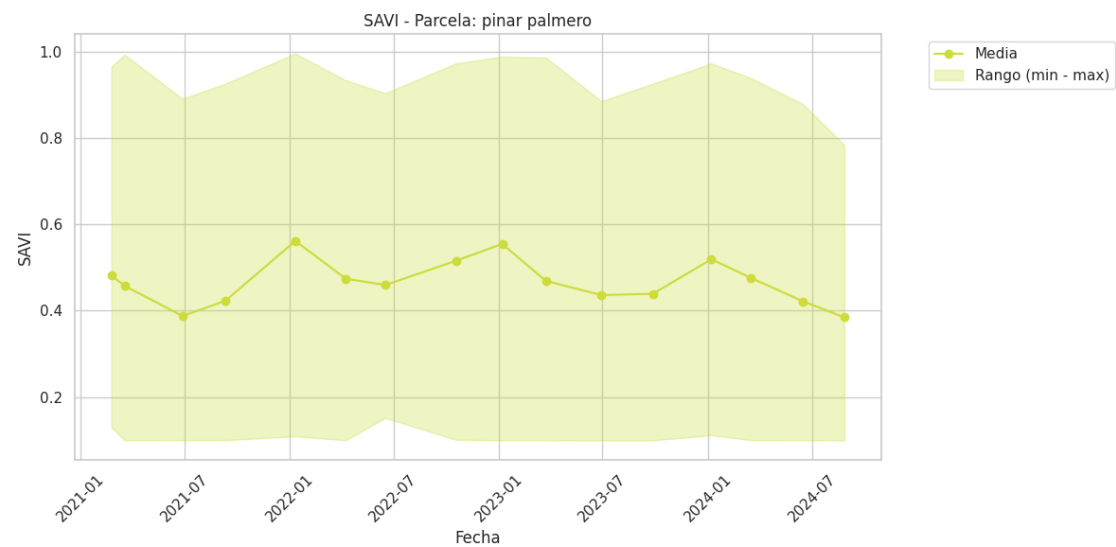


Figura AVI.30 SAVI calculado para la parcela de Pinar Palmero, mostrando la media y el rango completo de valores (mínimo–máximo) en cada fecha.

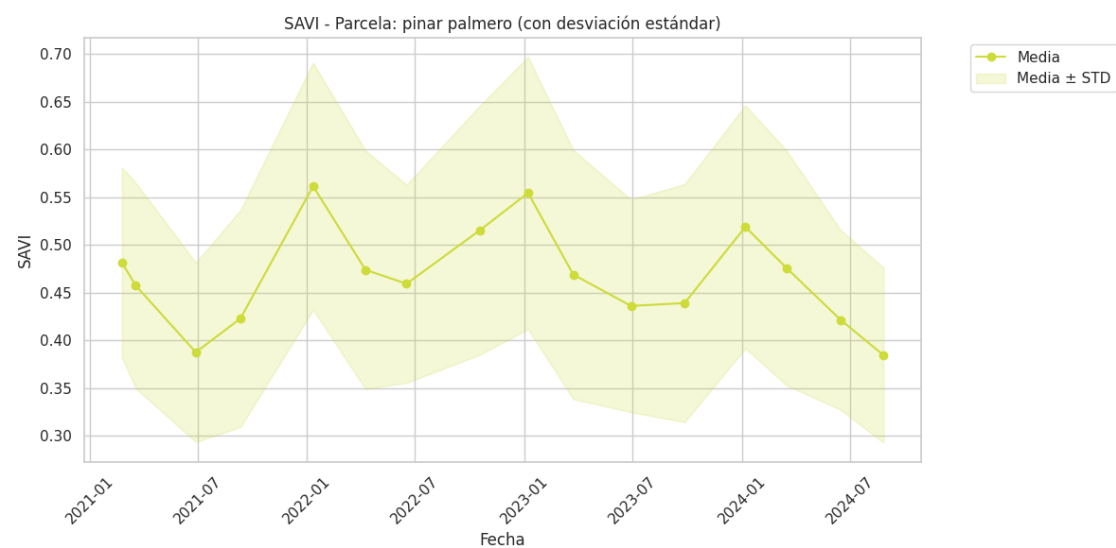


Figura AVI.31 SAVI calculado para la parcela Pinar Palmero, mostrando la media y la variabilidad interna mediante la desviación estándar.

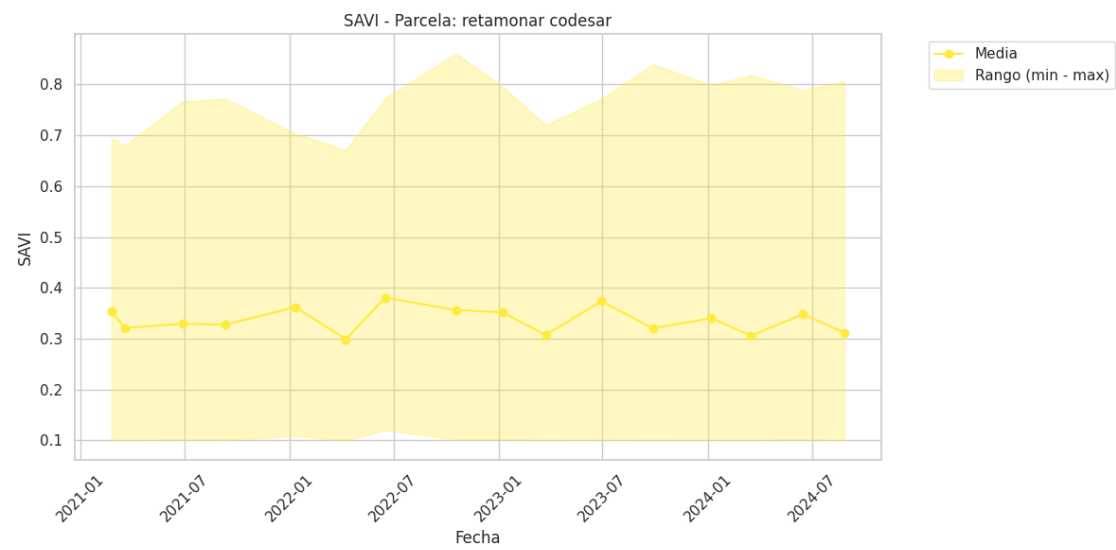


Figura AVI.32 SAVI calculado para la parcela de Retamonar Codesar, mostrando la media y el rango completo de valores (mínimo–máximo) en cada fecha.

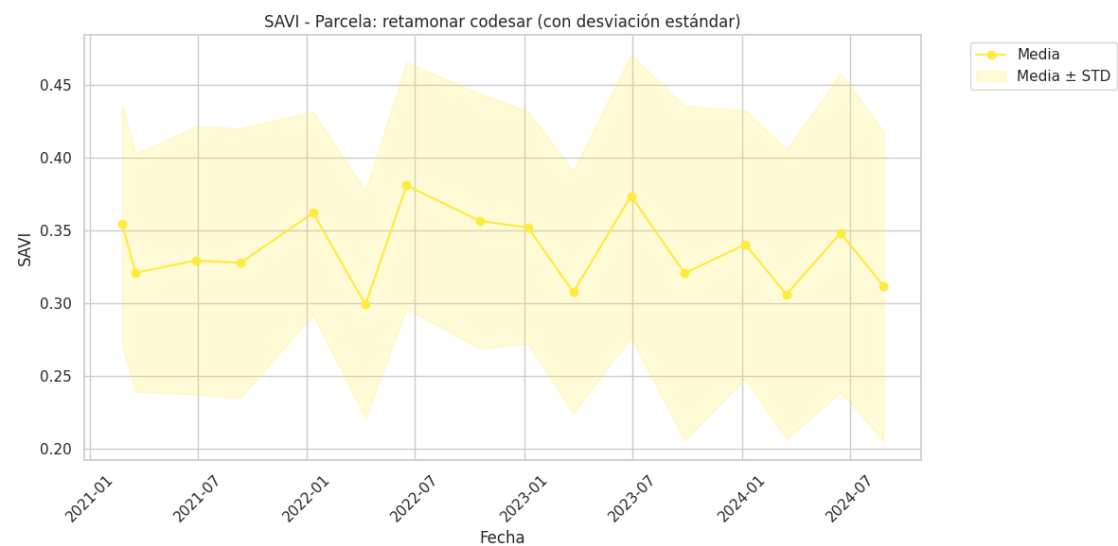


Figura AVI.33 SAVI calculado para la parcela Retamonar Codesar, mostrando la media y la variabilidad interna mediante la desviación estándar.

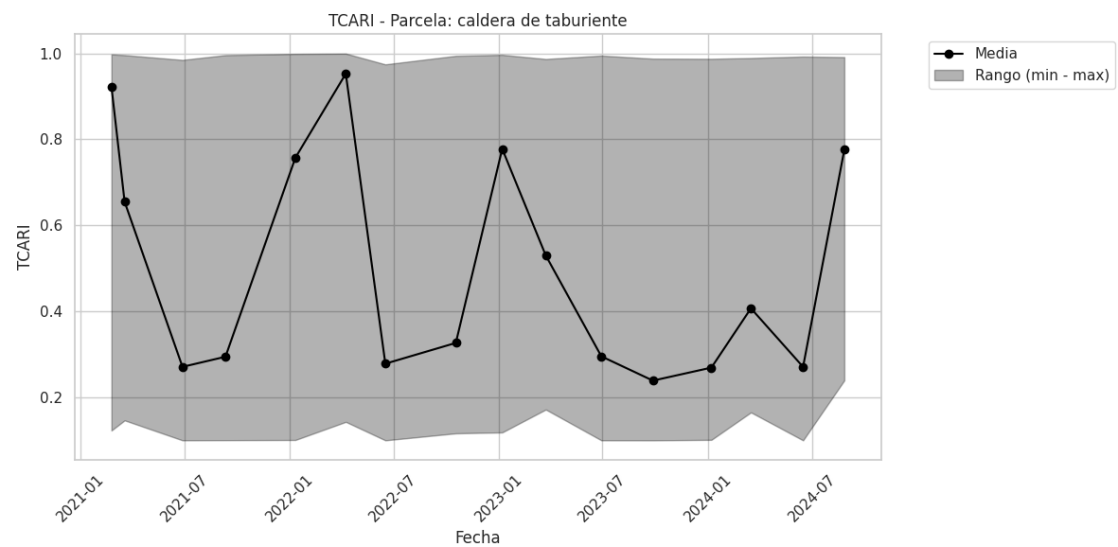


Figura AVI.34 TCARI calculado para la parcela de La Caldera de Taburiente, mostrando la media y el rango completo de valores (mínimo–máximo) en cada fecha.

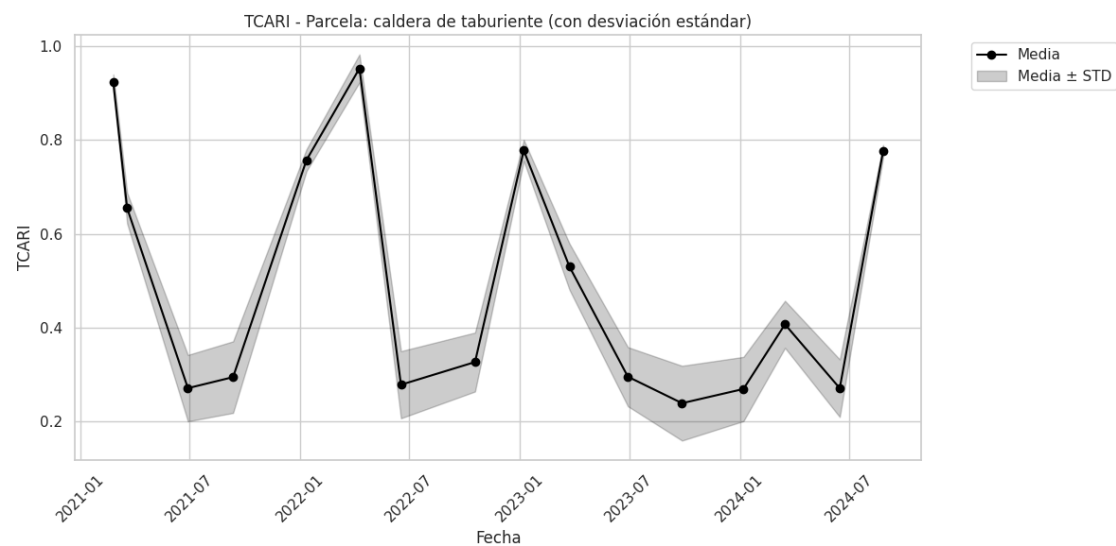


Figura AVI.35 TCARI calculado para la parcela de La Caldera de Taburiente, mostrando la media y la variabilidad interna mediante la desviación estándar.

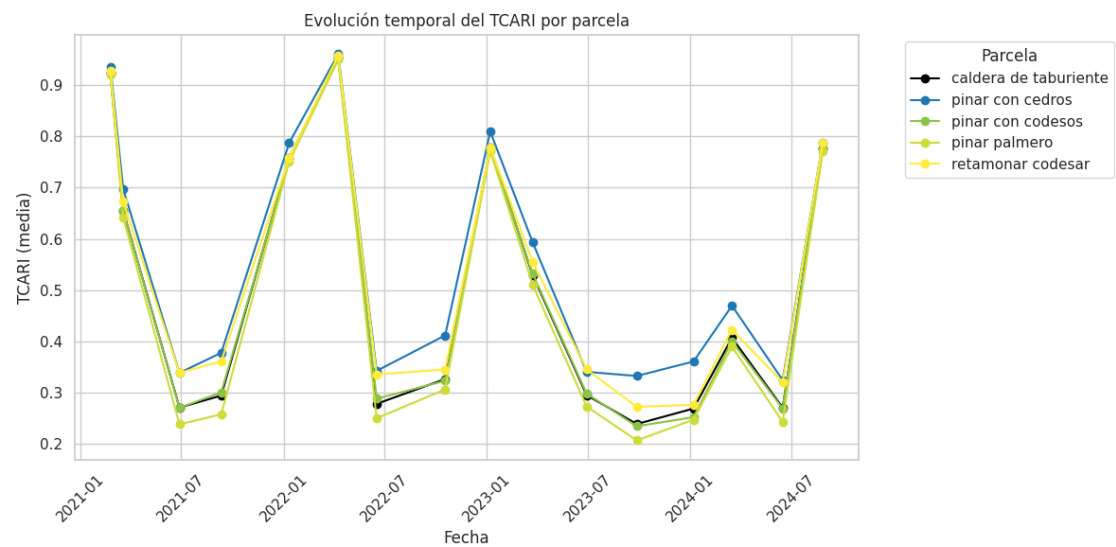


Figura AVI.36 TCARI calculado para cada parcela. Evolución temporal.

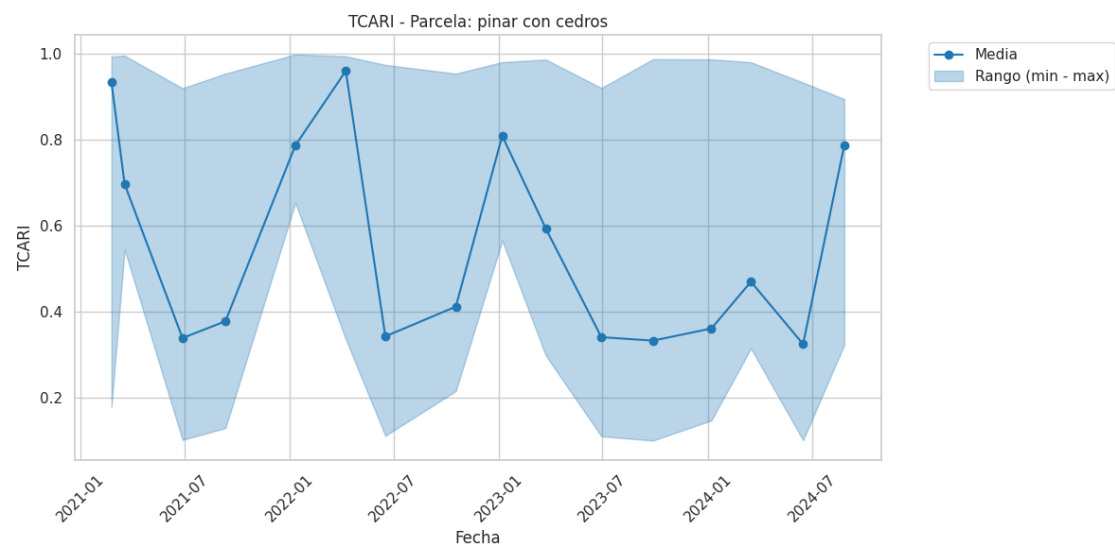


Figura AVI.37 TCARI calculado para la parcela de Pinar con Cedros, mostrando la media y el rango completo de valores (mínimo–máximo) en cada fecha.

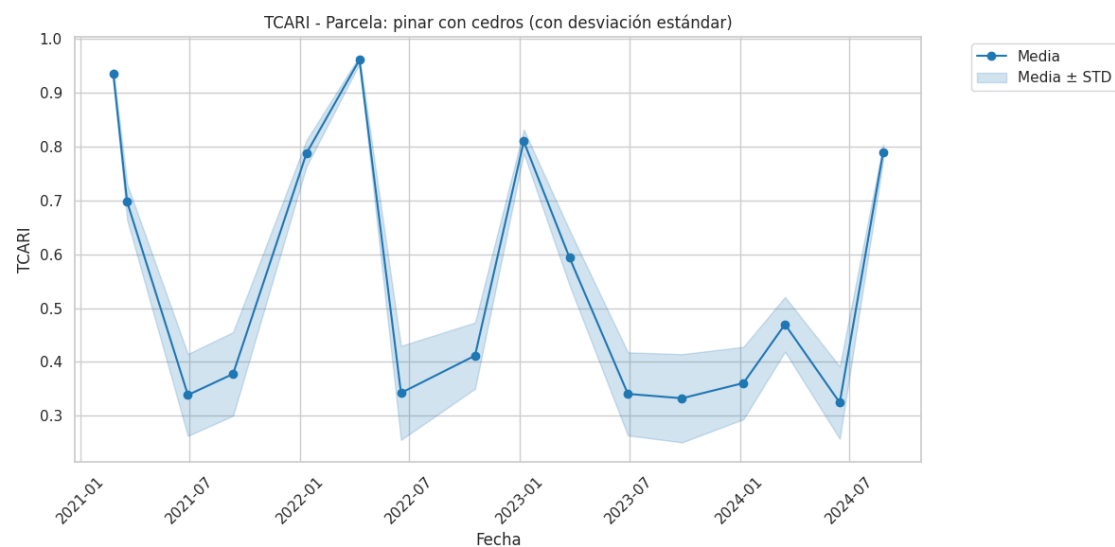


Figura AVI.38 TCARI calculado para la parcela Pinar con Cedros, mostrando la media y la variabilidad interna mediante la desviación estándar.

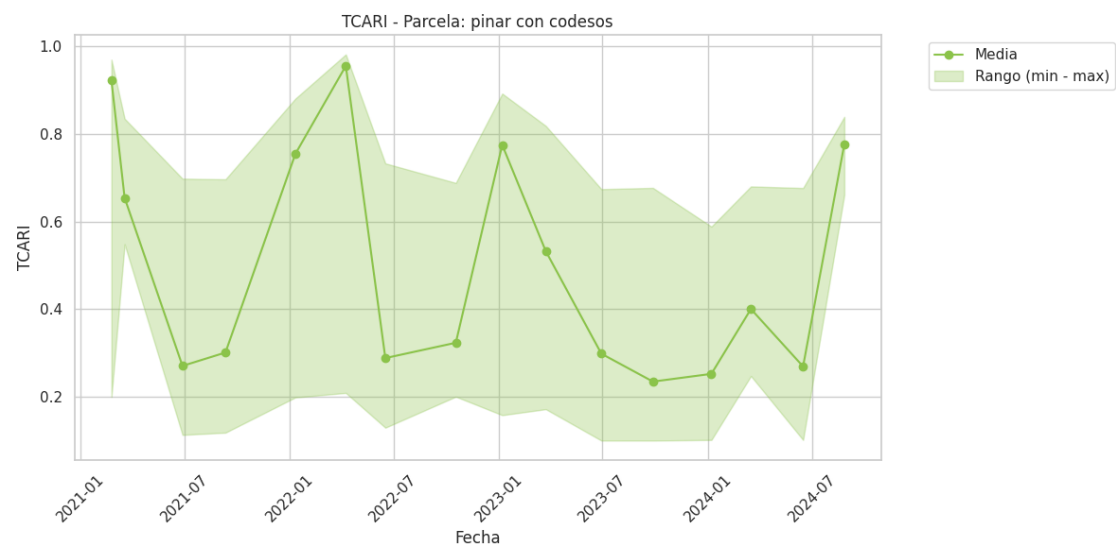


Figura AVI.39 TCARI calculado para la parcela de Pinar con Codesos, mostrando la media y el rango completo de valores (mínimo–máximo) en cada fecha.

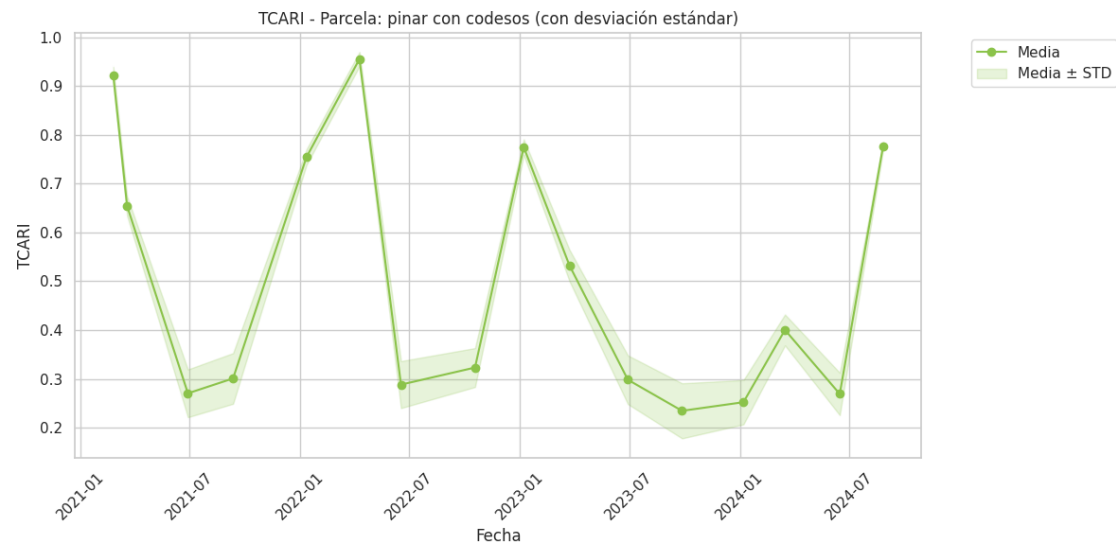


Figura AVI.40 TCARI calculado para la parcela Pinar con Codesos, mostrando la media y la variabilidad interna mediante la desviación estándar.

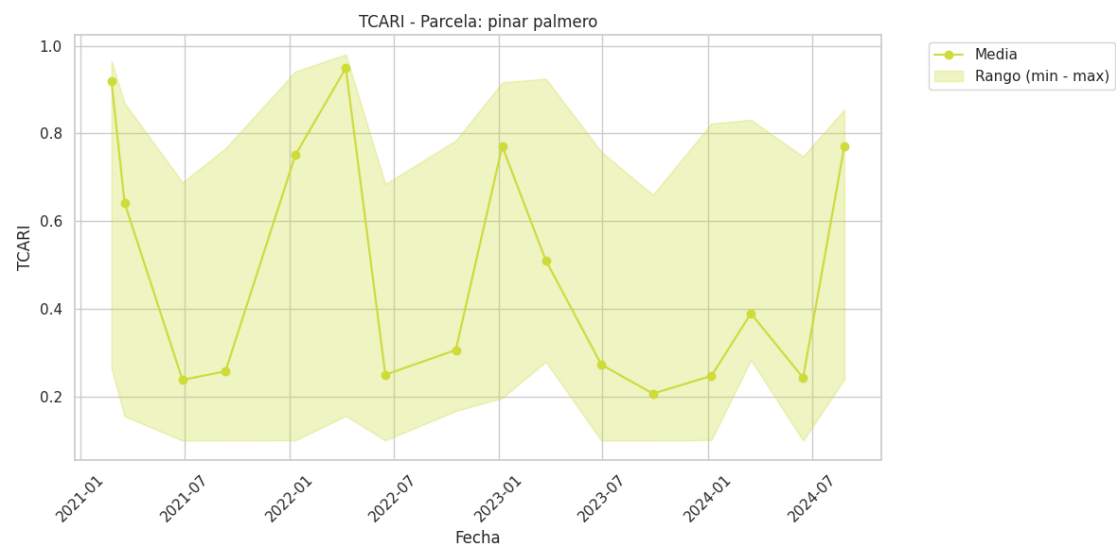


Figura AVI.41 TCARI calculado para la parcela de Pinar Palmero, mostrando la media y el rango completo de valores (mínimo–máximo) en cada fecha.

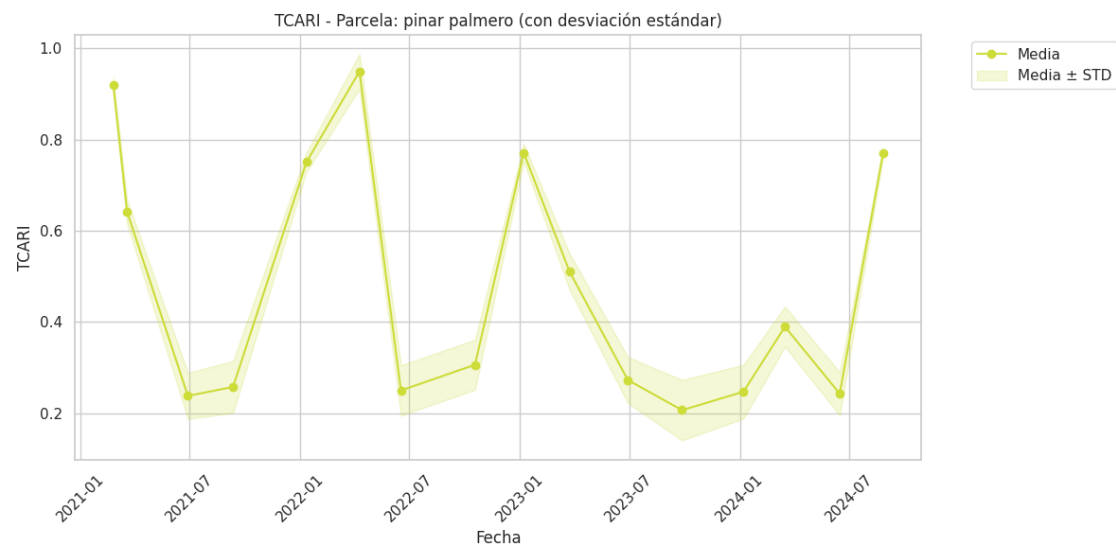


Figura AVI.42 TCARI calculado para la parcela Pinar Palmero, mostrando la media y la variabilidad interna mediante la desviación estándar.

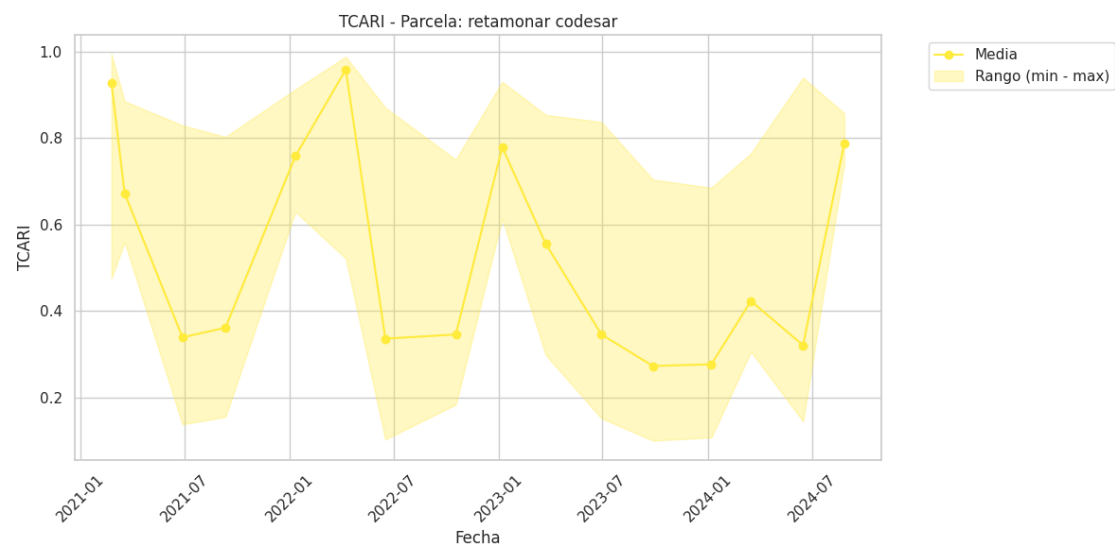


Figura AVI.43 TCARI calculado para la parcela de Retamonar Codesar, mostrando la media y el rango completo de valores (mínimo–máximo) en cada fecha.

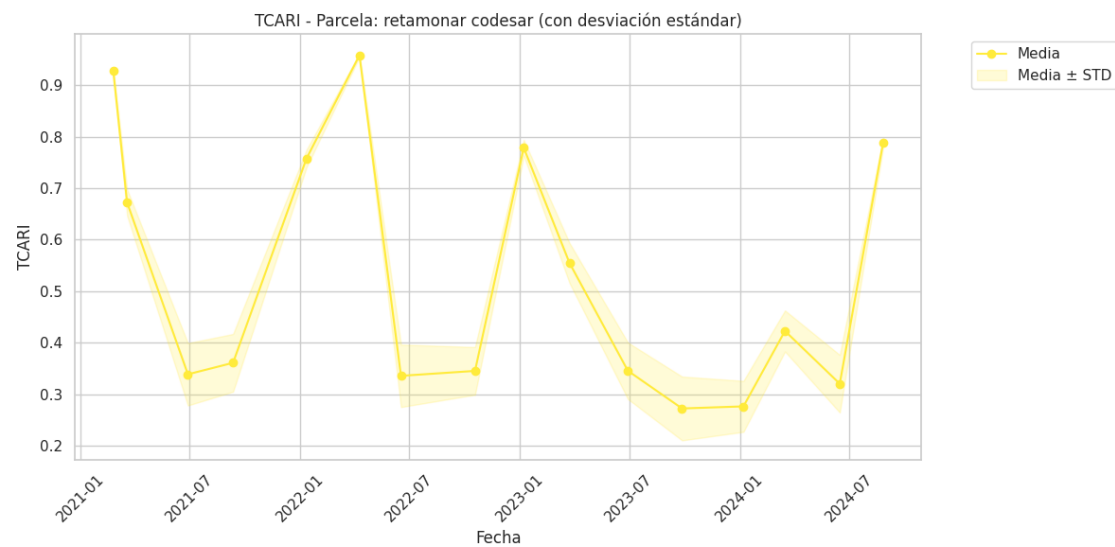


Figura AVI.44 TCARI calculado para la parcela Retamonar Codesar, mostrando la media y la variabilidad interna mediante la desviación estándar.

ANEXO VII. Código utilizado para el cálculo de índices de vegetación

Contiene el código completo utilizado para calcular los índices de vegetación, incluyendo la extracción de bandas, aplicación de máscaras y generación de los distintos índices.

AVII.1 Montar google drive

```
from google.colab import drive
drive.mount('/content/gdrive')
```

AVII.2 Extracción de bandas

```
from osgeo import gdal
import numpy as np

np.seterr(divide='ignore', invalid='ignore')

# Ruta al archivo .tif
tif_path = '/content/gdrive/MyDrive/PROCESADO TFG/New
Imagery/PN_Taburiente_20210628_115314_87_2426_psscene_analytic8b_sr
_udm2/20210628_115314_87_2426_3B_AnalyticMS_SR_8b_harmonized_clip.t
if'

# Abrir el archivo .tif
raster = gdal.Open(tif_path)

# Verificar si se abrió correctamente
if not raster:
    raise Exception(f"No se pudo abrir el archivo: {tif_path}")

# Verificar cuántas bandas tiene
num_bands = raster.RasterCount
print(f"Número de bandas: {num_bands}")

# Diccionario de nombres de bandas según su índice
band_names = {
    1: "B1 (Coastal Blue)",
    2: "B2 (Blue)",
    3: "B3 (Green I)",
    4: "B4 (Green)",
    5: "B5 (Yellow)",
    6: "B6 (Red)",
    7: "B7 (Red Edge)",
    8: "B8 (Infrared)"
}

# Leer todas las bandas y almacenarlas
bandas = {}

for i in range(1, num_bands + 1):
    data = raster.GetRasterBand(i).ReadAsArray()
    bandas[i] = data
    nombre = band_names.get(i, f"Banda {i}")
    print(f"{nombre} leída correctamente con forma {data.shape}")
```

```
print(f"{nombre} - Min: {np.nanmin(data)}, Max: {np.nanmax(data)}\n")
```

AVII.3 Máscara para corregir nubes y sombras

```
import rasterio
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Rutas de entrada
ruta_raster = '/content/gdrive/MyDrive/PROCESADO TFG/New Imagery/PN_Taburiente_20240826_mosaic_24f9_psscene_analytic8b_sr_udm2/20240826_mosaic_24f9_3B_AnalyticMS_SR_8b_harmonized_clip.tif'
ruta_udm2 = '/content/gdrive/MyDrive/PROCESADO TFG/New Imagery/PN_Taburiente_20240826_mosaic_24f9_psscene_analytic8b_sr_udm2/20240826_mosaic_24f9_3B_udm2_clip.tif'

# Función para aplicar máscara con detección de sombra y nubes
def aplicar_mascara_completa(ruta_raster, ruta_udm2):
    with rasterio.open(ruta_raster) as src:
        imagen = src.read().astype('float32') / 10000 # Escalar a [0,1]
        perfil = src.profile

    with rasterio.open(ruta_udm2) as udm:
        mascara_udm = udm.read(1) # 1 = válido, 0 = nubes/sombras

    # Sombra: valores NIR bajos (B8 = índice 7)
    sombra_extra = imagen[7] < 0.05

    # Nube: valores altos en bandas azul (B2) y NIR (B8)
    nube_extra = (imagen[1] > 0.3) & (imagen[7] > 0.3)

    # Máscara combinada
    mascara_valida = (mascara_udm == 1) & (~sombra_extra) & (~nube_extra)

    print(f'Porcentaje de píxeles válidos: {100 * np.mean(mascara_valida):.2f}%')

    # Aplicar máscara
    mascara_expandida = np.broadcast_to(mascara_valida, imagen.shape)
    imagen_masc = np.where(mascara_expandida, imagen, np.nan)

    return imagen_masc, perfil, mascara_valida, sombra_extra, nube_extra

# Ejecutar
```

Trabajo Fin de Grado

```
imagen_corregida, perfil_raster, mascara_valida, sombra, nubes =
aplicar_mascara_completa(ruta_raster, ruta_udm2)

# Asignar las bandas desde la imagen corregida de nubes/sombras
B1 = imagen_corregida[0] # Coastal Blue
B2 = imagen_corregida[1] # Blue
B3 = imagen_corregida[2] # Green I
B4 = imagen_corregida[3] # Green
B5 = imagen_corregida[4] # Yellow
B6 = imagen_corregida[5] # Red
B7 = imagen_corregida[6] # Red Edge
B8 = imagen_corregida[7] # Infrared

# Mostrar los valores estadísticos solo sobre los datos válidos
(sin nubes/sombras)
band_names = {
    1: "B1 (Coastal Blue)",
    2: "B2 (Blue)",
    3: "B3 (Green I)",
    4: "B4 (Green)",
    5: "B5 (Yellow)",
    6: "B6 (Red)",
    7: "B7 (Red Edge)",
    8: "B8 (Infrared)"
}

print("Valores normalizados por banda tras aplicar la máscara de
nubes/sombras:\n")
for i, band in enumerate([B1, B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8],
start=1):
    print(f"{band_names[i]} - Min: {np.nanmin(band):.4f}, Max:
{np.nanmax(band):.4f}")

# Máscara UDM2
plt.figure(figsize=(5,5))
plt.imshow(mascara_valida, cmap='gray')
plt.title("Máscara final (válido = blanco)")
plt.axis('off')
plt.show()

# Nubes detectadas
plt.figure(figsize=(5,5))
plt.imshow(nubes, cmap='Reds')
plt.title("Nubes detectadas (rojo)")
plt.axis('off')
plt.show()

# Sombras detectadas
plt.figure(figsize=(5,5))
```

Trabajo Fin de Grado

```
plt.imshow(sombra, cmap='Blues')
plt.title("Sombras detectadas (azul)")
plt.axis('off')
plt.show()

# Banda roja corregida
plt.figure(figsize=(6,6))
plt.imshow(imagen_corregida[5], cmap='gray') # Banda 6 = roja
plt.title("Banda roja corregida (nubes y sombras eliminadas)")
plt.axis('off')
plt.colorbar()
plt.show()
```

AVII.4 Cálculo de índices de vegetación BBG

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# imagen_corregida definida de antes (con nubes y sombras
eliminadas)
# Extraer las bandas desde esa variable
B1 = imagen_corregida[0] # Coastal Blue
B2 = imagen_corregida[1] # Blue
B3 = imagen_corregida[2] # Green I
B4 = imagen_corregida[3] # Green
B5 = imagen_corregida[4] # Yellow
B6 = imagen_corregida[5] # Red
B7 = imagen_corregida[6] # Red Edge
B8 = imagen_corregida[7] # Infrared

# importar funciones de índices desde BBG.ipynb
%run "/content/gdrive/MyDrive/PROCESADO
TFG/Code/BBG_v2.0_corrigido.ipynb"

# Calcular índices (desde el .ipynb)
EVI = BBG_EVI()
GEMI = BBG_GEMI()
GNDVI_1, GNDVI_2 = BBG_GNDVI()
MSR, SR = BBG_MSR()
NDVI = BBG_NDVI()
SAVI = BBG_SAVI()
WDRVI = BBG_WDRVI()
YNDVI = BBG_YNDVI()

# Calcular MSAVI2 directamente
def BBG_MSAVI2():
    numerator = 2 * B8 + 1
    denominator = np.sqrt((2 * B8 + 1)**2 - 8 * (B8 - B6))
```

Trabajo Fin de Grado

```
msavi2 = (numerator - denominator) / 2
return msavi2

MSAVI2 = BBG_MSAVI2()

print("ÍNDICES BBG:\n")

plt.imshow(NDVI, cmap='RdYlGn')
plt.colorbar()
plt.title("NDVI")
plt.show()

plt.imshow(EVI, cmap='RdYlGn')
plt.colorbar()
plt.title("EVI")
plt.show()

plt.imshow(SAVI, cmap='RdYlGn')
plt.colorbar()
plt.title("SAVI")
plt.show()

plt.imshow(MSAVI2, cmap='RdYlGn')
plt.colorbar()
plt.title("MSAVI2")
plt.show()

plt.imshow(SR, cmap='RdYlGn')
plt.colorbar()
plt.title("SR")
plt.show()

plt.imshow(MSR, cmap='RdYlGn')
plt.colorbar()
plt.title("MSR")
plt.show()

plt.imshow(GEMI, cmap='RdYlGn')
plt.colorbar()
plt.title("GEMI")
plt.show()

plt.imshow(GNDVI_1, cmap='RdYlGn')
plt.colorbar()
plt.title("GNDVI_1")
plt.show()

plt.imshow(YNDVI, cmap='RdYlGn')
```

Trabajo Fin de Grado

```
plt.colorbar()
plt.title("YNDVI")
plt.show()

plt.imshow(WDRVI, cmap='RdYlGn')
plt.colorbar()
plt.title("WDRVI")
plt.show()
```

AVII.5 Cálculo de índices de vegetación NBG

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Extraer bandas desde la imagen corregida
B1 = imagen_corregida[0] # Coastal Blue
B2 = imagen_corregida[1] # Blue
B3 = imagen_corregida[2] # Green I
B4 = imagen_corregida[3] # Green
B5 = imagen_corregida[4] # Yellow
B6 = imagen_corregida[5] # Red
B7 = imagen_corregida[6] # Red Edge
B8 = imagen_corregida[7] # Infrared

# Importar funciones de índices NBG
%run "/content/gdrive/MyDrive/PROCESADO
TFG/Code/NBG_v2.0_normalizado.ipynb"

# Calcular índices NBG usando funciones
ARVI = NBG_ARVI(1)
MCARI2 = NBG_MCARI2()
MTVI2 = NBG_MTVI2()
RENDVI = NBG_RENDVI()
REPI = NBG_REPI()
TCARI = NBG_TCARI()

print("ÍNDICES NBG:\n")

plt.imshow(RENDVI, cmap='RdYlGn')
plt.colorbar()
plt.title("RENDVI")
plt.show()

plt.imshow(ARVI, cmap='RdYlGn')
plt.colorbar()
plt.title("ARVI")
plt.show()
```


Trabajo Fin de Grado

```
plt.imshow(TCARI, cmap='RdYlGn')
plt.colorbar()
plt.title("TCARI")
plt.show()
```

```
plt.imshow(MCARI2, cmap='RdYlGn')
plt.colorbar()
plt.title("MCARI2")
plt.show()
```

```
plt.imshow(REPI, cmap='RdYlGn')
plt.colorbar()
plt.title("REPI")
plt.show()
```

```
plt.imshow(MTVI2, cmap='RdYlGn')
plt.colorbar()
plt.title("MTVI2")
plt.show()
```

AVII.6 Se guardan los resultados en mi DRIVE

```
import os
from osgeo import gdal

# Ruta del raster base
tif_path = '/content/gdrive/MyDrive/PROCESADO TFG/New
Imagery/PN_Taburiente_20240826_mosaic_24f9_psscene_analytic8b_sr_ud
m2/20240826_mosaic_24f9_3B_AnalyticMS_SR_8b_harmonized_clip.tif'

# Abrir raster para tomar referencia espacial
raster = gdal.Open(tif_path)
trans = raster.GetGeoTransform()
proj = raster.GetProjection()
x_shape = raster.RasterXSize
y_shape = raster.RasterYSize

driver = gdal.GetDriverByName("GTiff")

# Crear carpeta de salida basada en la fecha del archivo
nombre_raster = os.path.basename(tif_path)
fecha_raw = nombre_raster.split('_')[0]
fecha_formateada = f"{fecha_raw[6:8]} {fecha_raw[4:6]}
{fecha_raw[0:4]}"

output_base = "/content/gdrive/MyDrive/PROCESADO TFG/Results/"
output_folder = os.path.join(output_base, fecha_formateada)
os.makedirs(output_folder, exist_ok=True)
```

```
# Guardar cada índice del diccionario 'indices'
for nombre_indice, array in indices.items():
    nombre_archivo = f"{fecha_formateada} {nombre_indice}.tif"
    output_path = os.path.join(output_folder, nombre_archivo)

    print(f" Guardando {nombre_indice} en {output_path}")

    dst_ds = driver.Create(output_path, x_shape, y_shape, 1,
gdal.GDT_Float32)
    dst_ds.SetGeoTransform(trans)
    dst_ds.SetProjection(proj)
    dst_ds.GetRasterBand(1).WriteArray(array)
    dst_ds.FlushCache()
    dst_ds = None
```