

**ESCUELA DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN
Y ELECTRÓNICA**



TRABAJO DE FIN DE GRADO

**FUSIÓN DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES
Y DATOS LIDAR PARA EL ANÁLISIS FORESTAL**

Titulación: Grado en Ingeniería en Tecnologías de la Telecomunicación

Mención: Sistemas de Telecomunicación

Autor: Guillermo Cárdenes Díaz

Tutores: Javier Marcello Ruiz
Francisco Eugenio González

Fecha: Julio de 2023

Agradecimientos

Aprovechar este espacio para expresar mi sincero agradecimiento a todas las personas que han sido parte directa e indirectamente en la realización de este Trabajo de Fin de Grado.

Primeramente, destacar el papel de mis tutores, principalmente el de Javier, por su inestimable dedicación y asesoramiento a lo largo de este proyecto. Expresar mi profunda gratitud por su implicación, experiencia y conocimientos, claves para la investigación realizada y la consecución de los resultados deseados. Agradezco su disponibilidad, paciencia y ánimos ante todas las dudas y cuestiones surgidas durante el proceso. Mi más sincera admiración por la labor que desempeñan y la pasión con que lo hacen, son sin dudas referentes tanto a nivel personal como profesional.

Agradecer a D. Ángel Fernández, director del Parque Nacional de Garajonay, por proporcionar los datos de campo empleados en el presente Trabajo de Fin de Grado, por su análisis de los resultados y por la atención mostrada a las consultas que se le realizaron durante el desarrollo del trabajo.

También, extender mi gratitud hacia todos los profesores que han sido parte de mi formación académica y, como no, al personal de secretaría y dirección de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC) y la Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” por su labor y orientación durante el proceso de traslado de expediente, gracias al que hoy día es posible la culminación de mis estudios en el Grado de Ingeniería en Tecnologías de las Telecomunicaciones en la ULPGC.

Por último, no olvidar a familiares y amigos. Su apoyo, consejos y motivación me han impulsado a seguir adelante y han sido claves para mi crecimiento.

¡Gracias a todos!

Índice de Contenido

PARTE I: MEMORIA	1
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	2
1.1. ANTECEDENTES.....	2
1.2. OBJETIVOS	4
1.3. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	5
CAPÍTULO 2. TELEDETECCIÓN FORESTAL	7
2.1. FUNDAMENTOS DE LA TELEDETECCIÓN	7
2.2. TELEDETECCIÓN LiDAR	8
2.2.1. <i>Tecnología LiDAR</i>	8
2.2.2. <i>Datos LiDAR</i>	10
2.2.3. <i>Herramientas de procesado de datos LiDAR</i>	12
2.3. TELEDETECCIÓN MULTIESPECTRAL	14
2.3.1. <i>Imágenes multiespectrales</i>	14
2.3.2. <i>Satélite WorlView-2</i>	16
2.3.3. <i>Herramientas de procesado de datos WorldView-2</i>	18
CAPÍTULO 3. PROCESADO DE DATOS DE TELEDETECCIÓN PARA EL ANÁLISIS FORESTAL.....	19
3.1. INTRODUCCIÓN	19
3.2. PREPROCESADO DE DATOS LiDAR	19
3.3. PREPROCESADO DE DATOS MULTIESPECTRALES.....	22
3.3.1. <i>Índices de vegetación</i>	25
3.4. CLASIFICACIÓN DE DATOS DE TELEDETECCIÓN	28
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DEL ESTADO DE SALUD VEGETAL EN EL PARQUE NACIONAL DE GARAJONAY	31
4.1. ZONA DE ESTUDIO	31
4.2. DATOS DE CAMPO DEL PNG	33
4.3. ANÁLISIS CON DATOS LiDAR.....	35
4.3.1. <i>Preprocesado LiDAR</i>	36
4.3.2. <i>Validación de los datos de elevación del dosel arbóreo</i>	50
4.3.3. <i>Análisis de estado de salud de la vegetación</i>	54
4.4. ANÁLISIS CON DATOS MULTIESPECTRALES.....	58
4.4.1. <i>Preprocesado multiespectral</i>	59
4.4.2. <i>Generación de mapas de índices de vegetación</i>	63
4.4.3. <i>Estimación estadística para la selección de umbrales de desvitalización</i>	64
4.4.3. <i>Análisis de estado de salud de la vegetación</i>	66
4.5. ANÁLISIS COMPARATIVO MULTISENSOR	68
CAPÍTULO 5. CLASIFICACIÓN DE ESPECIES FORESTALES EN EL PARQUE NACIONAL DE GARAJONAY	70
5.1. INTRODUCCIÓN	70
5.2. DATOS DE CAMPO.....	70
5.3. CLASIFICACIÓN A PARTIR DE DATOS LiDAR	72
5.4. CLASIFICACIÓN A PARTIR DE DATOS MULTIESPECTRALES.....	78
5.4. ANÁLISIS COMPARATIVO MULTISENSOR	81

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES	83
6.1. REVISIÓN DE LOS OBJETIVOS PROPUESTOS.....	83
6.2. CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	84
6.3. LÍNEAS DE TRABAJO FUTURAS.....	86
PARTE II: BIBLIOGRAFÍA	88
BIBLIOGRAFÍA	89
PARTE III: PRESUPUESTO	96
PRESUPUESTO.....	97
P1. RECURSOS HARDWARE	97
P2. RECURSOS SOFTWARE	98
P3. DATOS LiDAR.....	98
P4. IMAGEN SATELITAL	98
P5. RECURSOS HUMANOS	99
P6. AMORTIZACIÓN.....	99
P7. REDACCIÓN DEL DOCUMENTO	99
P8. MATERIAL FUNGIBLE	100
P9. IMPUESTOS.....	100
PARTE IV: ANEXOS.....	102
ANEXOS	103
A.1. INTRODUCCIÓN.....	103
A.2. PREPROCESADO DE DATOS LiDAR.....	103
A.2.1. <i>Unión de nubes de puntos</i>	103
A.2.2. <i>Generación del modelo digital del terreno (MDT) empleando la clasificación de suelo de GRAFCAN</i>	104
A.2.3. <i>Generación del modelo digital de superficie (MDs)</i>	104
A.2.3. <i>Generación del modelo digital del dosel (CHM)</i>	104
A.3. VALIDACIÓN DE DATOS LiDAR	105
A.3.1. <i>Recorte de región de interés de la nube de puntos</i>	105
A.3.2. <i>Generación de estadísticas de la nube de puntos de vegetación de Lamaqué</i>	105
A.3. CONVERSIÓN DE FORMATO DTM A ASCII.....	105

Índice de Figuras

FIGURA 2.1. ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE TELEDETECCIÓN CON OBJETIVO LA CUBIERTA TERRESTRE	7
FIGURA 2.2. (A) REPRESENTACIÓN DE COMPONENTES EN UN SISTEMA LiDAR AEROPORTADO. (B) SUBSISTEMAS DEL ESCÁNER LÁSER	9
FIGURA 2.3. RETORNOS LiDAR SEGÚN EL MATERIAL DETECTADO	11
FIGURA 2.4. (A) NUBE DE PUNTOS LiDAR CLASIFICADA SEGÚN EL TIPO DE OBJETO. (B) LEYENDA Y PALETA DE COLORES DE REPRESENTACIÓN DE CLASES LAS.....	11
FIGURA 2.5. CURVAS DE REFLECTANCIA ESPECTRAL DE LA VEGETACIÓN, EL SUELO Y EL AGUA	15
FIGURA 2.6. DIFERENCIA ENTRE IMAGEN RGB, MULTIESPECTRAL E HIPERESPECTRAL	15
FIGURA 2.7. BANDAS ESPECTRALES DEL WORDVIEW-2	17
FIGURA 3.1. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PREPROCESADO DE DATOS LiDAR.....	20
FIGURA 3.2. EJEMPLO DE: (A) MDT, (B) MDS Y (c) CHM	22
FIGURA 3.3. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PREPROCESADO DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES	23
FIGURA 3.4. FIRMAS ESPECTRALES DE DISTINTOS ELEMENTOS	26
FIGURA 3.5. (A) MAPA SIN CLASIFICAR. (B) MAPA CLASIFICADO.	30
FIGURA 4.1. (A) ORTOFOTO DE LA REGIÓN DEL PNG, EN LA ISLA DE LA GOMERA. (B) VISTA DE LA ZONA NORTE DEL PARQUE	31
FIGURA 4.2. VALORACIÓN DE LOS DIFERENTES NIVELES DE SEVERIDAD EN EL ÁREA AFECTADA POR EL INCENDIO EN EL PARQUE NACIONAL DE GARAJONAY Y LA ZONA PERIFÉRICA DE PROTECCIÓN.....	33
FIGURA 4.3. PARCELAS DE CAMPO GLOBALES (MARCADORES ROJOS) Y DETALLADAS (MARCADORES AMARILLOS).	34
FIGURA 4.4. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PREPROCESADO LiDAR.	35
FIGURA 4.5. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE LA SALUD VEGETAL DEL PNG.....	36
FIGURA 4.6. PARCELAS LiDAR DE GRAFCAN DE LA GOMERA	37
FIGURA 4.7. NUBE DE PUNTOS INTEGRADA DEL TOTAL DE PARCELAS QUE ABARCAN AL PNG. EN ESCALA DE VERDES, SEGÚN EL VALOR DE ALTITUD SOBRE EL NIVEL DEL MAR.....	38
FIGURA 4.8. FUNCIÓN DE DESVIACIÓN ESTÁNDAR	39
FIGURA 4.9. NUBE DE PUNTOS AMPLIADA DE REGIÓN DEL PNG, CENTRADA EN LAS COORDENADAS 28.104253 N, 17.242693 E. (A) ORIGINAL. FILTRADA CON OUTLIER PARA MULTIPLICADORES DE DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE (B) 5, (c) 6 Y (d) 7	40
FIGURA 4.10. (A) NUBE DE PUNTOS ORIGINAL REPRESENTADA CON PALETA DE COLOR ARCOÍRIS SEGÚN ALTITUD DE CADA PUNTO RESPECTO AL NIVEL DEL MAR. (B) MDT GENERADO CON GRIDSURFACECREATE EMPLEANDO LA CLASE 2	41
FIGURA 4.11. MDT GENERADO CON GRIDSURFACECREATE, FILTRO DE CLASE 2 Y FILTRO DE MEDIANA PARA VENTANA VECINA DE: (A) 4M, (B) 6M, (c) 8M Y (d) 10	42
FIGURA 4.12. MDT GENERADO CON GRIDSURFACECREATE CON FILTRO CLASE 2 Y FILTRO DE PICOS PARA VALORES DE: (A) 30%, (B) 40% Y (c) 50%.	43
FIGURA 4.13. (A) MDT GENERADO CON GRIDSURFACECREATE Y FILTRO DE CLASE 2. (B) MDT GENERADO CON GRIDSURFACECREATE Y FILTRO DE CLASE 2 MÁS EL FILTRO DE PICOS PARA 50% DE PENDIENTE.	43
FIGURA 4.14. MDTs GENERADOS CON $G = -2$ Y $W = 2$: (A) SIN FILTRADO ADICIONAL, CON FILTERDATA PARA OUTLIER: (B) 5 Y (c) 7.....	45
FIGURA 4.15. (A) MDT GENERADO SIN EMPLEAR FILTROS. (B) MDT GENERADO EMPLEANDO FILTRO DE PICOS PARA VALOR 50%.....	45
FIGURA 4.16. (A) MDT GENERADO EMPLEANDO LA CLASE 2 DE GRAFCAN Y FILTRO DE PICOS CON VALOR 50%. (B) MDT GENERADO ESTIMANDO LOS PUNTOS DE SUELLO Y EMPLEANDO EL FILTRO DE PICOS CON VALOR 50%.	46
FIGURA 4.17. MODELO RÁSTER DEL MDT, REPRESENTADO EN: (A) EN MODELO DE SOMBRAS, (B) PALETA DE COLORES ARCOÍRIS INVERTIDA EN FUNCIÓN DE LA ALTURA RESPECTO AL NIVEL DEL MAR.....	47

FIGURA 4.18. SECCIÓN AMPLIADA DE: (A) MDS FINAL, (B) MDT FINAL Y (C) MDS SUPERPUESTO, REPRESENTADO POR MALLA VERDE, POR SOBRE MDT, REPRESENTADO EN GRIS CONTINUO, DESDE DIFERENTES PERSPECTIVAS.....	48
FIGURA 4.19. SECCIÓN AMPLIADA DEL CHM FINAL DESDE DIFERENTES PERSPECTIVAS.....	49
FIGURA 4.20. MODELO RÁSTER DEL CHM DEL PARQUE NACIONAL DE GARAJONAY.....	49
FIGURA 4.21. COORDENADAS DE PARCELA LAMAQUÉ.....	52
FIGURA 4.22. NUBE DE PUNTOS LiDAR DE PARCELA LAMAQUÉ DESDE: (A) VISTA AÉREA, (B) VISTA FRONTAL.....	52
FIGURA 4.23. NUBE DE PUNTOS LiDAR DE PARCELA LAMAQUÉ DESDE: (A) VISTA GENERAL SATELITAL DEL PNG Y (B) VISTA SATELITAL DETALLADA DE LA ZONA DONDE SE UBICA.....	53
FIGURA 4.24. DISTRIBUCIÓN DE ESPECIES DE LAURISILVA SEGÚN ALTURA.....	56
FIGURA 4.25. MAPEO DEL DOSEL ESCALADO SEGÚN ALTURA.....	56
FIGURA 4.26. ZONAS ELEVADAS DEL PNG DONDE SE APRECIA DESVITALIZACIÓN, IDENTIFICADAS EN COLOR ROJO. (A), (D) MODELO DIGITAL DEL DOSEL ESCALADO. (B), (E) VISTA SATELITAL DE GOOGLE. (C), (F) MODELO DIGITAL DEL TERRENO.	57
FIGURA 4.27. (A) MAPEO DE MAYOR RESOLUCIÓN DEL DOSEL DEL PNG RESPECTO A LA ALTURA. (B) ZONAS DETECTADAS CON PROBLEMAS DE DESVITALIZACIÓN SEGÚN ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	58
FIGURA 4.28. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PREPROCESADO DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES.....	58
FIGURA 4.29. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE LA SALUD VEGETAL DEL PNG.....	59
FIGURA 4.30. IMAGEN MULTIESPECTRAL DE WORLDVIEW-2 EN RGB.....	59
FIGURA 4.31. FIRMAS ESPECTRALES ANTES (SUPERIOR) Y DESPUÉS DE LA CORRECCIÓN PARA UNA SUPERFICIE VEGETAL....	62
FIGURA 4.32. DTM DE LA ISLA DE LA GOMERA.....	62
FIGURA 4.33. SUPERPOSICIÓN DE ORTOFOTO CON: (A) IMAGEN DE WV-2 SIN ORTORECTIFICACIÓN Y (B) IMAGEN DE WV-2 ORTOREFIJADA GEOMÉTRICAMENTE.....	63
FIGURA 4.34. MAPA DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN DEL PNG: (A) NDVI, (B) EVI Y (C) WDRVI.....	64
FIGURA 4.35. FIRMAS ESPECTRALES DE LAS DISTINTAS CLASES.....	64
FIGURA 4.36. EJEMPLO ROI DE VEGETACIÓN DESVITALIZADA. (A) ORTOFOTO. (B) IMAGEN WORLDVIEW-2.....	65
FIGURA 4.37. ESTADÍSTICAS DE VEGETACIÓN PARA LOS ÍNDICES: (A) EVI, (B) NDVI Y (C) WDRVI.....	66
FIGURA 4.38 ÁRBOL DE DECISIÓN EMPLEADO.....	67
FIGURA 4.39. (A) MAPA DE VIGOROSIDAD DE TODO EL PNG A PARTIR DEL ÍNDICE WDRVI NORMALIZADO. DETALLE DEL MAPA EN ZONA: (A) NORTE, (B) SURESTE, (C) SUR Y (D) OESTE.....	68
FIGURA 4.40. MAPA DE VIGOROSIDAD DEL PNG GENERADO A PARTIR DE DATOS: (A) LiDAR Y (B) MULTIESPECTRALES....	69
FIGURA 5.1. IMÁGENES DE ESPECIES IDENTIFICADAS EN EL PARQUE NACIONAL DE GARAJONAY. (A) ERICA CANARIENSIS. (B) ERICA PLATYCODON. (C) PERSEA ÍNDICA (VIÑÁTIGO). (D) LAURUS NOVOCANARIENSIS (LAUREL). (E) PICCONIA EXCELSA (PALO BLANCO). (F) MORELLA FAYA (FAYA). (G) APOLLONIAS BARBUJANA (BARBUSANO). (H) ILEX CANARIENSIS (ACEBIÑO). (I) OCOTEA FOETENS (TILO).	71
FIGURA 5.2. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROCESO DE CLASIFICACIÓN DE ESPECIES.....	72
FIGURA 5.3. HISTOGRAMAS DE CADA ESPECIE SEGÚN NIVELES DE ALTURA.....	73
FIGURA 5.4. DIAGRAMA DE CAJAS DE ESPECIES MÁS REPRESENTATIVAS DE SEGÚN ALTURA.....	74
FIGURA 5.5. MAPAS DE ESPECIES DEL PNG GENERADOS A PARTIR DE DATOS LiDAR DEL 2017.....	76
FIGURA 5.6. MAPA DE ESPECIES PROPORCIONADOS POR LA DIRECCIÓN DEL PNG.....	76
FIGURA 5.7. AMPLIACIÓN ZONA OESTE DE MAPA DE ESPECIES: (A) DE LA DIRECCIÓN DEL PNG, (B) MAPA 1, (C) MAPA 2, (D) MAPA 3, (E) MAPA 4, (F) MAPA 5, (G) MAPA 6	77
FIGURA 5.8. (A) MAPA DE VEGETACIÓN: (A) GENERADO A PARTIR DE LA NUBE DE PUNTOS LiDAR DE GRAFCAN, Y (B) PROPORCIONADO POR LA DIRECCIÓN DEL PNG.	78
FIGURA 5.9. METODOLOGÍA PARA LA CLASIFICACIÓN DE ESPECIES CON DATOS MULTIESPECTRALES.....	78
FIGURA 5.10. CLASES VEGETALES SOBRE LA IMAGEN WORLDVIEW-2 DE 2020: (A) FAYAL-BREZAL Y (B) LAURISILVA.....	80
FIGURA 5.11. FIRMA ESPECTRAL DE CADA CLASE: (A) MEDIA Y (B) DESVIACIÓN ESTÁNDAR.	80
FIGURA 5.12. MAPAS DE ESPECIES DEL PNG OBTENIDOS CON LOS MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN: (A) SVM Y (B) SAM....	81
FIGURA 5.13. (A) MAPA DE ESPECIES PROPORCIONADO POR LA DIRECCIÓN DEL PNG. MAPA DE ESPECIES DEL PNG GENERADO A PARTIR DE: (B) DATOS LiDAR, IMÁGENES MULTIESPECTRALES A TRAVÉS DEL MÉTODO DE CLASIFICACIÓN: (C) SVM Y (D) SAM.	82

Índice de Tablas

TABLA 4.1. RESULTADOS OBTENIDOS SEGÚN VALORES DEL MULTIPLICADOR DE DESVIACIÓN.....	39
TABLA 4.2. RESULTADOS OBTENIDOS SEGÚN VALORES DE G Y W DE GROUNDFILTER.....	44
TABLA 4.3. ESTADÍSTICAS DE MUESTREO EN CAMPO DE LA TOTALIDAD ARBÓREA DE LA PARCELA LAMAQUÉ.....	50
TABLA 4.4. ESTADÍSTICAS DE MUESTREO EN CAMPO DE ÁRBOLES SALUDABLES DE LA PARCELA LAMAQUÉ.	51
TABLA 4.5. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE ALTURA DEL ARBOLADO.	54
TABLA 4.6. ESTADÍSTICOS DE CAMPO DE PARCELAS GLOBALES.	55
TABLA 4.7. TABLA DE SELECCIÓN DE MODELO ATMOSFÉRICO EN FUNCIÓN DE LA LATITUD Y EL MES [78].	61
TABLA 4.8. CLASES Y UMBRALES DE ÍNDICE WDRVI PARA ANÁLISIS DE VIGOROSIDAD DEL PNG.....	66
TABLA 5.1. DATOS DE CAMPO DE ESPECIES DETECTADAS EN PARCELAS A NIVEL GLOBAL.....	72
TABLA 5.2. CRITERIO DE CLASIFICACIÓN DE ESPECIES.	74
TABLA 5.3. RELACIÓN DE MAPAS A GENERAR EN FUNCIÓN DE LOS VALORES UMBRALES.....	75
TABLA 5.5. SEPARABILIDAD DE LAS CLASES.	80
TABLA P.1. COSTE DE RECURSOS HARDWARE.....	97
TABLA P.2. COSTE DE RECURSOS SOFTWARE.....	98
TABLA P.3. COSTE DE DATOS LiDAR.	98
TABLA P.4. COSTE DE IMAGEN SATELITAL.....	98
TABLA P.5. COSTE DE RECURSOS HUMANOS.....	99
TABLA P.5. AMORTIZACIÓN DE RECURSOS HARDWARE.....	99
TABLA P.6. AMORTIZACIÓN DE RECURSOS SOFTWARE.....	99
TABLA P.7. COSTE TOTAL DEL PROYECTO.	100
TABLA P.8. COSTE TOTAL DEL PROYECTO, IMPUESTOS INCLUIDOS.....	100

Resumen

Desde sus inicios con la fotografía aérea desde un globo aerostático, la teledetección ha tomado cada vez mayor relevancia por su potencial de proporcionar información coherente y actualizada de la superficie terrestre. Se trata de un campo que se encuentra en constante crecimiento y que genera muchas expectativas, empleándose en múltiples y variadas aplicaciones en distintos sectores de las ciencias.

Una de las áreas donde más se ha potenciado el uso de técnicas de detección remotas, por su capacidad de cobertura y precisión, es la de estudios medioambientales. Esta tecnología permite el estudio y monitoreo de una amplia gama de fenómenos ambientales a nivel global, regional y local. En este sentido, destaca el empleo de sensores satelitales y aerotransportados para la gestión de recursos naturales.

La teledetección se beneficia de una variedad de sensores y plataformas para adquirir datos de distinta naturaleza en diferentes resoluciones espaciales y temporales. En este contexto, destacan los sensores multiespectrales por su capacidad de distinguir características de los objetos y su composición a través del análisis de su firma espectral, y los sensores láser activos por su potencial para estimar la altura de los objetos.

El Parque Nacional de Garajonay, ubicado en la isla de La Gomera, es un referente del ecosistema canario en el que habita una gran biodiversidad de especies de flora y fauna, muchas de las cuales son endémicas de la isla de La Gomera. Dada la complejidad de su relieve y la dificultad de acceso a distintas zonas para la gestión efectiva de sus recursos vegetales, se propone la aplicación de las técnicas de teledetección y metodologías de procesado descritas en este TFG para estudiar la vigorosidad y la distribución espacial de las especies vegetales del Parque Nacional de Garajonay.

Abstract

Since its beginnings with aerial photography from a hot air balloon, remote sensing has become increasingly relevant for its potential to provide coherent and updated information of the earth's surface. It is a field that is in constant growth and generates many expectations, being used in multiple applications in different sectors of science.

Due to its coverage and precision, environmental studies are one of the areas where the use of remote sensing techniques has been powered the most. This technology allows the study and monitoring of a wide range of environmental events at global, regional, and local levels. In this sense, the use of satellite and airborne sensors for the management of natural resources stands out.

Remote sensing benefits from a variety of sensors and platforms to acquire different nature data in different spatial and temporal resolutions. In this context, multispectral sensors stand out for their ability to distinguish characteristics of objects and their composition through the analysis of their spectral signature, and active laser sensors for their potential to estimate the height of objects.

The Garajonay National Park, located on the island of La Gomera, is a reference of the Canary ecosystem in which inhabits a great biodiversity of flora and fauna endemic species. The Garajonay relief is very complex, and it is difficult to access the different zones to manage their plant resources. Therefore, the application of remote sensing techniques and processing methodologies described in this Bachelor's Final Project is proposed to study the vigor and spatial distribution of plant species in Garajonay National Park.

Listado de Acrónimos

NDVI	Índice De Vegetación De Diferencia Normalizada
TVI	Índice De Vegetación Transformada
SAVI	Índice De Vegetación Ajustado Al Suelo
VIN	Número De Índice De Vegetación
VID	Diferencia Del Índice De Vegetación
PVI	Índice De Vegetación Perpendicular
MSI	Índice De Estrés Hídrico
NDII	Índice Infrarrojo De Diferencia Normalizada
NBR	Índice Normalizado De Área Quemada
NDSI	Índice Diferencial Normalizado De Nieve
LiDAR	Ligh Detection And Ranging
SAR	Radar De Apertura Sintética
3D	Tridimensional
TFG	Trabajo De Fin De Grado
GPS	Sistema De Posicionamiento Global
IMU	Unidad De Medida Inercial
IGN	Instituto Geográfico Nacional
USGS	Servicio Geológico De Los Estados Unidos
ESDS	Programa De Sistemas De Datos De Ciencias De La Tierra
GEDI	Investigación De Dinámica De Ecosistemas Globales
SIG	Sistemas De Información Geográfica
LDV	Lidar Data Viewer
WV-2	Wordview-2
Pan	Pancromáticas
NIR2	Infrarrojo Cercano 2
NIR1	Infrarrojo Cercano 1
ENVI	Environment For Visualizing Images
MDT	Modelo Digital Del Terreno

MDS	Modelo Digital De Superficie
CHM	Modelo Digital Del Dosal
DN	Números Digitales Brutos
FLAASH	Fast Line-Of-Sight Atmospheric Analysis Of Spectral Hypercubes
IVs	Índices De Vegetación
EVI	Enhanced Vegetation Index
WDRVI	Wide Dynamic Range Vegetation Index
RED	Roja
NIR	Infrarroja Cercana
LAI	Índice De Área Foliar
SVM	Support Vector Machine
SAM	Spectral Angle Mapper
JM	Jeffries-Matusita
PNG	Parque Nacional De Garajonay
CD	Clases Diamétricas
SAW	Invierno Subártico
MLW	Invierno De Latitud Media
T	Tropical
MLS	Verano De Latitud Media
SAS	Verano Subártico
RPC	Rational Polynomial Coefficient
RSM	Replacement Sensor Model
CNIG	Centro Nacional De Información Geográfica
ROI	Región De Interés
COITT	Colegio Oficial De Ingenieros Técnicos De Telecomunicación
P	Costes
IGIC	Impuesto General Indirecto Canario
CMD	Línea De Comandos

Parte I: Memoria

Capítulo 1. Introducción

En este capítulo inicial, se introduce brevemente acerca del proyecto y se describen los principales objetivos planteados para su realización, así como su alcance.

1.1. Antecedentes

Tanto en aplicaciones de inventario como ecológicas, es trascendental el proceso de recolección de datos para la evaluación, análisis y planificación de la gestión forestal. Debido al elevado coste de la realización de estas tareas de campo, se ha apostado notablemente por el empleo de las tecnologías de monitoreo remoto. Cada vez son más las aplicaciones y usos de los sistemas de teledetección por su potencial para recoger información coherente y actualizada sobre el estado de la superficie terrestre y estructuras verticales sobre ella [1].

Las técnicas de teledetección permiten la adquisición de información sobre objetos o áreas a través de datos captados por instrumentos que no requieren contacto directo con el objeto. Desde sus inicios con la fotografía aérea desde un globo, no ha parado de impulsarse su desarrollo y evolución. Esto ha llevado a que en la actualidad existan múltiples tipos de sistemas de teledetección que utilizándose para obtener información sobre la superficie terrestre [2].

Estos sistemas incluyen una amplia variedad de sensores y plataformas. Los sensores detectan, procesan y registran la radiación electromagnética reflejada o la emitida por las cubiertas terrestres. Según la fuente de energía empleada, los sensores son clasificados en activos, que emiten su propio haz de energía y reciben el retorno de ésta modificada, o en pasivos, que capturan la radiación electromagnética emitida o reflejada por la superficie terrestre [2]. Por otro lado, las plataformas utilizadas para la teledetección son muy diversas e incluyen satélites de observación de la Tierra, aviones, helicópteros y vehículos aéreos no tripulados (drones).

Es frecuente en aplicaciones relacionadas con el análisis de vegetación el empleo de sistemas ópticos de imágenes. Los sistemas ópticos de imágenes son capaces de cubrir datos de distintas longitudes de onda dentro del espectro óptico y también, más allá de las regiones visibles, abarcando el infrarrojo cercano y medio. Cada material, en función de su composición química,

refleja y absorbe la radiación a distintas longitudes de onda de forma única. A través de estas diferencias, se pueden identificar las cubiertas terrestres [3].

Los sensores ópticos varían según el número de bandas y el espectral con que capturan los datos de la imagen. Cada banda captura información sobre diferentes características y propiedades del objeto. Los sensores multiespectrales tienen un número limitado de bandas, mientras que los sensores hiperespectrales tienen cientos de bandas mucho más estrechas.

Mediante las imágenes espectrales de satélites como Sentinel-2A de la ESA, Landsat 8 OLI/TIRS de la NASA o WorldView-2 de *DigitalGlobe* se pueden obtener índices espectrales útiles para generar modelos físicos y empíricos capaces de caracterizar una amplia gama de variables forestales, tales como [4]:

- Actividad fotosintética, a través de los índices de vegetación, tales como NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), TVI (Índice de Vegetación Transformada), SAVI (Índice de Vegetación Ajustado al Suelo), VIN (Número de Índice de Vegetación), VID (Diferencia del Índice de Vegetación), o PVI (Índice de Vegetación Perpendicular).
- Contenido de humedad, a través de los índices MSI (Índice de Estrés Hídrico) y NDII (Índice Infrarrojo de Diferencia Normalizada).
- Severidad de fuego, a través del NBR (Índice Normalizado de Área Quemada).
- Cubiertas de nieve, a través del NDSI (Índice Diferencial Normalizado de Nieve).

Por otro lado, también destaca el empleo de sensores activos como son los sistemas LiDAR (del inglés *Ligth Detection and Ranging*) y de Radar de Apertura Sintética (SAR, del inglés *Synthetic Aperture Radar*). Dichos sistemas miden la retrodispersión del pulso emitido al reflejarse en la superficie terrestre. Los sensores SAR pueden diferenciar las características de la cubierta terrestre de acuerdo con su rugosidad superficial, la estructura tridimensional (3D) de los objetos y el contenido de agua. En función de la longitud de onda del sensor, la señal puede penetrar la vegetación, el dosel y el suelo. Por su parte, los sistemas LiDAR emiten pulsos láser y miden la distancia a un objetivo en función del retardo del pulso al reflejarse en la cubierta terrestre. Las diferencias en los tiempos de retorno del láser y las longitudes de onda se pueden utilizar para hacer representaciones tridimensionales del objeto [3].

A partir de las mediciones derivadas de la teledetección, es posible realizar estimaciones de biomasa forestal, cálculo de pérdida de CO₂ o cartografiados de especies, entre otros. La multitud de sensores de teledetección espacial existentes en la actualidad permiten recopilar datos a gran escala periódicamente, adquirir información sobre regiones no visibles del espectro.

electromagnético, y abarcar extensas áreas de cobertura en intervalos cortos de tiempo, incluso en zonas inaccesibles o de difícil acceso.

A medida que la demanda de inventarios forestales siga aumentando en un contexto de disminución de los recursos financieros, las tecnologías de teledetección desempeñarán una función cada vez más importante y variada en el proceso de inventario forestal. En este sentido destaca el empleo de sensores activos como los LiDAR y sensores pasivos como los multiespectrales. Parte de la información requerida se puede medir directamente con tecnologías avanzadas de teledetección, mientras que otra información requerida se puede derivar indirectamente a través de técnicas de procesado y obtención de modelos [5].

1.2. Objetivos

Por las características de su ecosistema, Canarias es el centro de biodiversidad más relevante de la Unión Europea y uno de los más destacados del mundo. Los distintos ecosistemas que componen al archipiélago canario están determinados y clasificados fundamentalmente por su altitud y el tipo de vegetación que más abunda en ellos. Actualmente, la Red Canaria de Espacios Naturales Protegidos está compuesta por 146 espacios que representan aproximadamente un 40% de la superficie del archipiélago, destacando el Parque Nacional de La Caldera de Taburiente (La Palma), el Parque Nacional de Garajonay (La Gomera), el Parque Nacional del Teide (Tenerife) y el Parque Nacional de Timanfaya (Lanzarote), cuyas riquezas naturales son consideradas patrimonio natural de Canarias [6].

En este contexto, en el presente Trabajo de Fin de Grado (TFG) se propone realizar un estudio del estado y la variedad de la vegetación del Parque Nacional de Garajonay a partir del análisis de datos LiDAR captados desde una aeronave y de imágenes multiespectrales del satélite de teledetección de alta resolución WorldView-2.

Para la consecución de este objetivo global, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- O1. Análisis de los datos LIDAR y multiespectrales de teledetección: Estudio de la naturaleza de los datos que ofrecen los sistemas de teledetección multiespectrales y LIDAR.
- O2. Estudio y aplicación de las técnicas de procesado a los datos de teledetección: Análisis de las diferentes técnicas de corrección que se aplicarán a los datos multiespectrales obtenidos del satélite WorldView-2 y a los datos LIDAR. También se estudiarán técnicas de registro de datos que garanticen su posterior comparación, así como técnicas de extracción paramétricas.

- O3. Empleo de los datos procesados para el análisis de salud vegetal: Realización de técnicas para la obtención y análisis de parámetros referentes al estado de la vegetación. Se incluye también la aplicación de dichas técnicas sobre los datos de teledetección anteriormente obtenidos para generar mapas de variables forestales.
- O4. Empleo de los datos procesados para la clasificación especies vegetales: Realización de un estudio de la viabilidad respecto a técnicas de clasificación para la discriminación de tipos de vegetación. Asimismo, se emplearán dichas técnicas con los datos de teledetección anteriormente obtenidos para generar mapas temáticos de especies forestales.

1.3. Estructura del documento

El presente documento se estructura en cuatro apartados fundamentales: memoria, bibliografía, presupuesto y anexos. A continuación, se describe brevemente el contenido de las partes:

Parte I. Memoria

En esta sección se detalla el proceso llevado a cabo durante la realización del presente TFG. La sección está compuesta por varios capítulos:

- Capítulo 1: Introducción.

En este capítulo inicial, se introduce brevemente el proyecto y se describen los principales objetivos planteados para su realización, así como su alcance.

- Capítulo 2: Teledetección forestal.

En este capítulo se introducen los sistemas de teledetección que serán empleados durante el desarrollo del TFG, así como sus características y principios básicos. Se indaga también sobre la información que se puede obtener a partir de los sistemas de teledetección WorldView-2 y LiDAR. Además, se comentan los posibles métodos y herramientas softwares para su procesado, almacenamiento y posterior utilización.

- Capítulo 3: Procesado de datos de teledetección para el análisis forestal.

En este capítulo se comentan las distintas correcciones y procesados que son necesarios aplicar a los datos LiDAR e imágenes multiespectrales del satélite WorldView-2 para ser empleados en tareas de análisis y obtención de resultados.

- Capítulo 4: Análisis del estado de la salud vegetal en el Parque Nacional de Garajonay.

En este capítulo se describen los procedimientos llevados a cabo para el análisis de la salud vegetal del Parque Nacional de Garajonay. Se aplican distintas técnicas de procesado para la obtención de mapas de vigorosidad a partir de las imágenes multiespectrales del satélite WorldView-2 y la detección de zonas desvitalizadas a partir de datos LiDAR.

- Capítulo 5: Clasificación de especies forestales en el Parque Nacional de Garajonay.
En este capítulo se aborda el estudio y la realización de mapas de especies de la vegetación del Parque Nacional de Garajonay a partir de datos LiDAR e imágenes multiespectrales.
- Capítulo 6: Conclusiones.
En este capítulo final, se analizan los resultados obtenidos y el grado de consecución de los objetivos propuestos. Además, se comentan las posibles líneas futuras de actuación como continuación del trabajo desarrollado en el presente TFG.

Parte II. Bibliografía

En este apartado se enumeran todas las fuentes citadas y consultadas durante la elaboración de la memoria del presente TFG.

Parte III. Presupuesto

Este apartado está dedicado a la realización de un análisis de viabilidad económica del Trabajo de Fin de Grado. Se detallan los costos asociados a la realización del trabajo.

Parte IV. Anexos

En esta sección se aportarán los comandos empleados en la metodología de procesado final de datos LiDAR mediante el uso del software FUSION.

Capítulo 2. Teledetección forestal

En este capítulo se introducen los sistemas de teledetección que serán empleados durante el desarrollo del TFG, así como sus características y principios básicos. Se indaga también sobre la información que se puede obtener a partir de los sistemas de teledetección WorldView-2 y LiDAR. Además, se comentan los posibles métodos y herramientas softwares para su procesado, almacenamiento y posterior utilización.

2.1. Fundamentos de la teledetección

La teledetección es la técnica por la que se puede obtener información de una superficie u objeto sin tener contacto con él, en función de la radiación electromagnética que éste emite o refleja como respuesta a una incidencia de radiación natural (teledetección pasiva) o artificial (teledetección activa). Todo sistema de teledetección está compuesto por: (a) un sensor que capta, codifica y transmite los datos del objeto de estudio, (b) un centro de recepción que decodifica, procesa y corrige los datos, y (c) un canal de distribución que los hace llegar hacia expertos y usuarios que la interpretarán, emplearán o darán una conclusión a partir de los mismos [2], [7].

Durante el proceso intervienen la fuente de energía, el objetivo, el sensor, el sistema de recepción, el intérprete y el usuario final. En la figura 2.1. se muestra una representación de estos elementos.

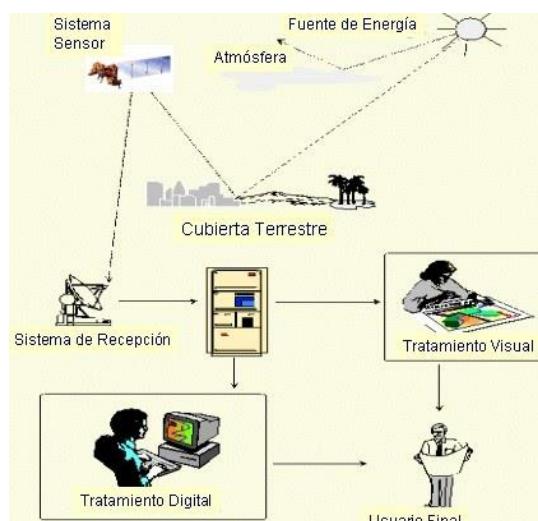


Figura 2.1. Elementos de un sistema de teledetección con objetivo la cubierta terrestre [7].

2.2. Teledetección LiDAR

A continuación, se describen los principios básicos de los sistemas de teledetección LiDAR. Se caracterizan los datos que estos sistemas proporcionan y los métodos para almacenarlos y utilizarlos.

2.2.1. Tecnología LiDAR

LiDAR (*Ligth Detection and Ranging*, por sus siglas en inglés) es una técnica de teledetección activa cuyo principio básico es similar al del radar, pero en lugar de utilizar ondas de radio como fuente de radiación, utiliza pulsos láser [8].

Su funcionamiento se basa en la estimación del tiempo transcurrido desde la emisión de un pulso láser hasta la recepción de un eco o retorno cuando el láser incide sobre un objeto situado sobre la superficie terrestre. A partir del tiempo medido por el sensor, conocido como tiempo de vuelo (t), se determina la distancia (R) entre el sensor y dicho objeto mediante la relación $R = ct/2$, donde c es la velocidad de la luz (300 000 km/s). Este proceso ocurre miles de veces por segundo, y cada vez que la luz toca un objeto o una superficie, rebota y vuelve al dispositivo emisor registrando las coordenadas del punto exacto en el que rebotó la luz [8], [9].

Lo que se obtiene con LiDAR es una serie de retornos que dibujan la superficie del objeto en que rebotó con información sobre las coordenadas (X, Y, Z), la intensidad y el número de retorno en función del sensor empleado. A partir de éstos se generan nubes tridimensionales de puntos que permiten describir detalladamente la superficie escaneada por el sensor, y mapear modelos superficiales y de elevación digital con gran precisión.

Para obtener las coordenadas XYZ y poder georreferenciar con precisión los datos, el sistema LiDAR combina la información que recibe de 3 componentes principales sincronizados en el tiempo: una unidad de escáner láser, un Sistema de Posicionamiento Global (GPS) y una Unidad de Medida Inercial (IMU). El escáner láser está compuesto por una unidad de telémetro láser basada en técnicas de medición de tiempo de vuelo compuesta por un emisor láser y un receptor electro-óptico, un dispositivo de desviación del haz que crea el patrón de escaneo deseado, y la unidad de control y procesamiento que sincroniza e intercambia información con los subsistemas GPS e IMU. El GPS proporciona la posición absoluta de la plataforma del sensor, y la IMU registra su actitud angular, incluyendo balanceo, cabeceo y guiñada/rumbo [8]–[10].

Los sistemas LiDAR móviles, además, cuentan con una plataforma móvil que conecta todo el hardware de recogida de datos en un solo sistema. Esta plataforma proporciona un método para

incorporar el vehículo utilizado en el proceso de recogida de datos. Típicamente, la plataforma es rígida y está calibrada con precisión para mantener las diferencias de posición entre el GPS, los escáneres y el equipo de imágenes [11].

En la Figura 2.2. se representa un ejemplo en el que se aprecian los tres componentes principales de los sistemas LiDAR, así como los subsistemas de su escáner láser.

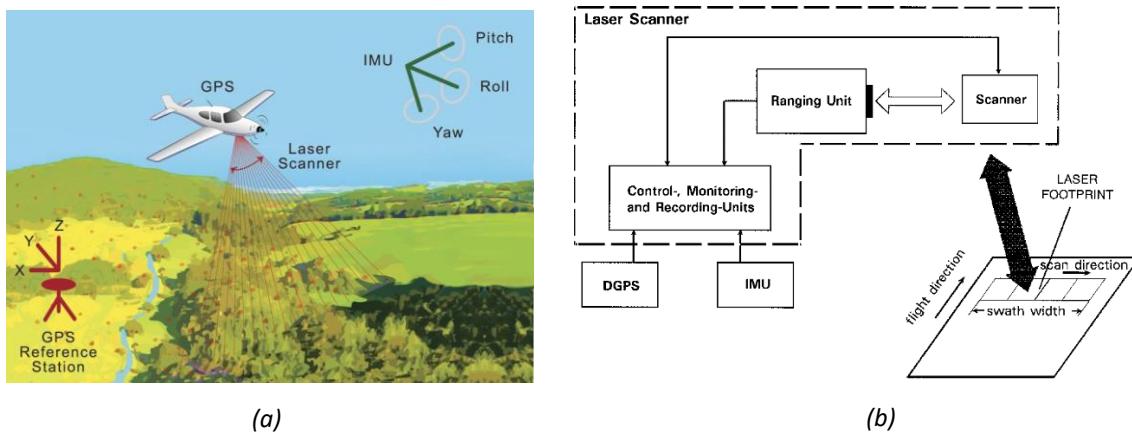


Figura 2.2. (a) Representación de componentes en un sistema LiDAR aeroportado. (b) Subsistemas del escáner láser [10], [12].

Dependiendo del sensor utilizado, las unidades de escaneo LiDAR pueden disparar cientos de miles de pulsos por segundo. Mientras mayor sea este número, mayor será el número de puntos recopilados por unidad de superficie y mayor será la densidad y precisión del mapeo.

Los sistemas LiDAR se caracterizan por: la longitud de onda del láser (nm), la duración del pulso (ns), la energía del pulso (nJ), la velocidad de emisión de pulsos (kHz), la anchura del pulso (mrad), el ángulo de escaneo (grados), la velocidad de escaneo (Hz), la altura de vuelo (m) y el tamaño de la huella sobre el terreno (m). El láser es relevante en el rendimiento general de un sistema LiDAR, puesto que son las especificaciones láser las que determinan el coste del sistema, el rendimiento y la viabilidad de una aplicación [12].

Dentro de las ventajas a destacar de esta tecnología se encuentran su rapidez, precisión, dependencia humana mínima y su capacidad de penetrar a través de la vegetación, con lo que se obtienen datos de superficie debajo del dosel. Esto último es fundamental para el objetivo de este TFG, que es realizar un análisis forestal. Esta tecnología permite identificar ligeros cambios de elevación utilizando densas nubes de puntos LiDAR, permitiéndonos mapear regiones con pocas variaciones de textura, incluidas las variaciones en la superficie de las copas de la vegetación. Diferentes patrones de retorno múltiple durante diferentes estaciones también pueden facilitar la clasificación de la vegetación [13].

2.2.2. Datos LiDAR

Los datos LiDAR son archivos de información de ficheros de nubes de puntos georreferenciados. Estos archivos están comúnmente almacenados en formato LAS (.las), que se ha convertido en el estándar por defecto para el trabajo con datos LiDAR. El formato LAS conserva los datos según la propia naturaleza y el sistema de captación empleado. En función de la resolución espacial de los sensores y la distribución espacial de los archivos que se generen, normalmente se trata de ficheros que ocupan elevadas capacidades de almacenamiento, siendo necesario en ocasiones proveer la información en el formato de compresión de LAS, denominado LAZ, facilitando la copia, descarga y almacenamiento de los datos [14].

Cada retorno de la nube de puntos almacenada por el sistema LiDAR contiene los siguientes atributos [15]–[17]:

- Intensidad: representa la fuerza con la que el láser rebota en el objeto y varía según la composición de la superficie del objeto donde el láser se refleja. Es especialmente útil para la diferenciación y autodetección de objetos, aunque en aplicaciones forestales no suele aportar mucha información. Muchos sistemas LiDAR son capaces de almacenar el valor de intensidad del eco, pudiéndose diferenciar colores y materiales. Por ejemplo, es posible diferenciar entre una carretera y suelo desnudo e incluso diferenciar la pintura sobre el asfalto.
- Número de retorno: representa el número de retorno actual respecto a todos los recibidos procedentes del mismo pulso láser (ver Figura 2.3).
- Cantidad de retornos: número total de devoluciones para un pulso láser dado. Dependiendo del material sobre el que incida la señal LiDAR, el sensor será capaz de recibir desde uno a varios ecos de un mismo pulso láser. Por ejemplo, en zonas identificadas como suelo se recibe típicamente un solo retorno, mientras que si se tratase de vegetación se reciben varios, donde el primero corresponderá a la parte superior del árbol.
- Clasificación del punto: según el tipo de objeto del que procede el retorno, los puntos se sombrean con un color determinado según los códigos de clasificación LAS. Esta clasificación se completa por parte de los proveedores de datos utilizando técnicas semiautomatizadas en la nube de puntos, por lo que no todos los archivos LiDAR incluyen esta información y dependerá únicamente de la fuente desde donde se adquieran. Las diversas clases se definen mediante códigos numéricos de enteros en el archivo LAS. En la Figura 2.4. se muestra un ejemplo de nube de puntos LiDAR clasificada, así como las clases de clasificación LAS y la paleta de colores de estas.

- Tiempo del GPS: fecha de emisión del pulso láser, en segundos del GPS de la semana.
- Ángulo de escaneo (-90º a 90º): a 0º el pulso está justo debajo del sensor, a -90º a la izquierda de éste y a +90º a la derecha.
- Dirección de escaneo: dirección del espejo rotatorio al momento de emitir el pulso láser, 1 cuando el escáner se mueve de izquierda a derecha de la dirección de vuelo en pista, y 0 lo contrario.

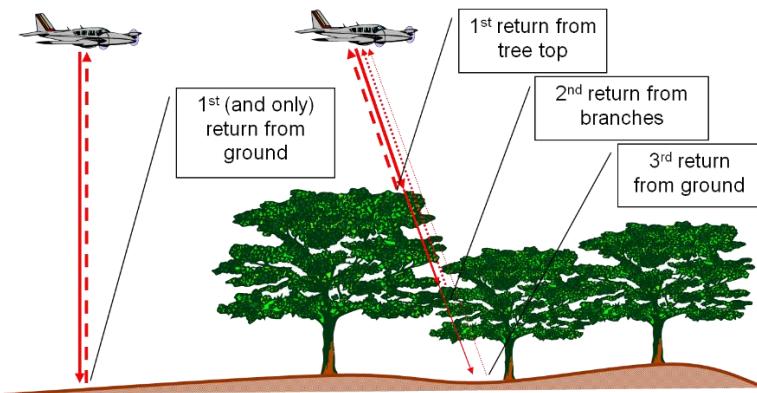
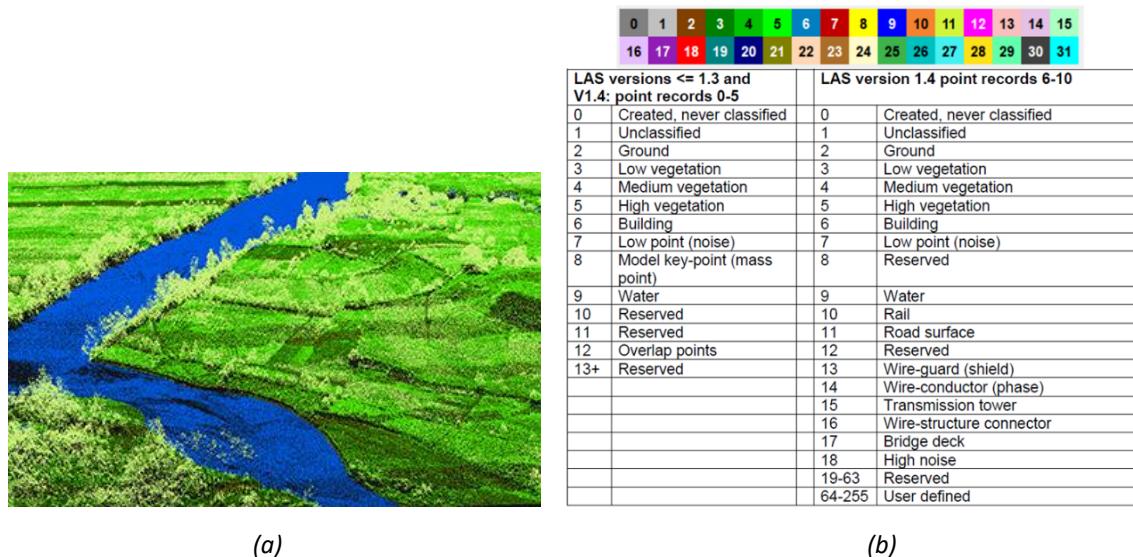


Figura 2.3. Retornos LiDAR según el material detectado [18].

En la imagen 2.4 se muestra la distribución de colores estandarizada para datos LiDAR:



(a)

(b)

Figura 2.4. (a) Nube de puntos LiDAR clasificada según el tipo de objeto. (b) Leyenda y paleta de colores de representación de clases LAS [19].

La calidad de los datos LiDAR está directamente relacionada con su precisión y densidad nominal, expresada en puntos por metros cuadrados (pto/m²). La densidad de la nube depende de la altura y velocidad de vuelo, la frecuencia de pulsos y el ángulo de escaneo. Mientras más densa sea la nube de puntos mejores resultados se podrán obtener, al disponer de más retornos para cada objeto detectado.

Existen diferentes proveedores de datos LiDAR, tanto públicos como privados, que ofrecen acceso a información LiDAR a nivel global para diferentes aplicaciones y áreas geográficas. Algunos de los más conocidos son:

- El Instituto Geográfico Nacional (IGN) español a través del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) que se inició en el año 2004, finalizando la primera cobertura completa del territorio español en 2015, año en el cual se comienza simultáneamente con la toma de datos de la segunda cobertura. Para Canarias la densidad es de 0.5 pto/m². En la actualidad, se inició ya la tercera cobertura que permitirá disponer de datos LiDAR gratuitos con una densidad de 5 pto/m², muy superior a las coberturas anteriores [20], [21].
- GRAFCAN, empresa pública de la Comunidad Autónoma de Canarias encargada de la gestión y distribución de información geográfica precisa y actualizada sobre las Islas Canarias. En su catálogo de información geoespacial ofrece datos LiDAR de bajo coste con una resolución espacial en torno a 1 pto/m² [22].
- El Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), a través de *LidarExplorer* proporciona acceso integrado a datos gratis LiDAR de los Estados Unidos, descargables desde su sitio web, así como de modelos digitales de elevación [23].
- El Programa de Sistemas de Datos de Ciencias de la Tierra (ESDS) de la NASA proporciona información LiDAR de la misión de Investigación de Dinámica de Ecosistemas Globales (GEDI) que ofrece la mayor resolución espacial y densidad de muestreo disponibles en datos procedentes de plataformas satelitales [24].

Para el desarrollo de este TFG, se decide emplear los datos LiDAR que proporciona GRAFCAN. En un principio se valoró emplear información LiDAR del PNOA, pero se tomó la decisión de utilizar la de GRAFCAN porque proporciona mayor densidad de puntos, con una media planificada de 1.20 ptos/m² y 0.8 ptos/m² en el nadir. El proyecto abarca toda la superficie de las Islas Canarias con una precisión próxima a los 0.60 m en planimetría y 0.20 m en altimetría [25].

2.2.3. Herramientas de procesado de datos LiDAR

El procesado de datos LiDAR es una tarea crítica en el análisis de la información recolectada por el sensor. Esta información se presenta en forma de nubes de puntos 3D, y para obtener información útil y relevante se requiere procesar y analizar los datos.

La selección del software de preprocesado adecuado es fundamental para garantizar el éxito en el análisis forestal. Dentro de los softwares de visualización y procesado LiDAR destacan:

- ArcGIS: software interactivo de Sistemas de Información Geográfica (SIG) basado en web desarrollado por la empresa ESRI que ofrece herramientas de mapeo y análisis de datos ráster y vectoriales, así como de datos LiDAR [26].
- QGIS: aplicación profesional de SIG de software libre y de código abierto. Proporciona una creciente gama de capacidades a través de sus funciones básicas y complementos para visualizar, gestionar, editar y analizar datos, y diseñar mapas imprimibles. QGIS no es solo un SIG de escritorio, sino que incluye también un explorador de archivos espaciales, una aplicación de servidor y aplicaciones web [27], [28].
- FUSION/LDV: software de libre acceso desarrollado por el Servicio Forestal de los Estados Unidos con el objetivo de ayudar a los investigadores a comprender, explorar y analizar datos LIDAR. El sistema de análisis y visualización consta de dos programas principales, FUSION y LDV (*LiDAR Data Viewer*), así como de una colección de programas de línea de comandos para tareas específicas. FUSION presenta todos los datos del proyecto mediante una visualización 2D típica de los sistemas de información geográfica. LDV proporciona el entorno de visualización 3D para el examen y la medición de subconjuntos de datos espacialmente explícitos. Los programas de línea de comandos proporcionan capacidades específicas de análisis y procesamiento de datos diseñadas para que FUSION sea adecuado para procesar grandes adquisiciones LIDAR, fundamentalmente en el ámbito de análisis forestal [19], [29].
- *Global Mapper*: software SIG de última generación que proporciona una completa gama de herramientas avanzadas de procesamiento de datos espaciales. En sus funcionalidades incluye: importación/exportación de datos, procesado de datos ráster, impresión de mapas, rectificación de imágenes, geocodificación, calculadora ráster, seguimiento GPS, entre otras [30].
- ENVI LiDAR: software de visualización, análisis y procesado a partir de imágenes geoespaciales. Permite crear visualizaciones 3D fotorrealistas y extraer fácilmente características y productos importantes a partir de datos LiDAR. IDL es el entorno informático empleado para su desarrollo y la comprensión de datos complejos mediante la visualización y el análisis interactivos [31].
- *LASTools*: colección de herramientas de línea de comandos multinúcleo altamente eficientes de procesamiento LiDAR. Ofrece una amplia variedad de módulos que permiten clasificar, convertir, filtrar, generar ráster, triangular, contornear y recortar información LiDAR. La interfaz de usuario que ofrece es poco amigable y sus funcionalidades públicas son muy básicas [32].

- LiDAR360: plataforma de procesamiento profesional de datos masivos de nubes de puntos desarrollada por *GreenValley International*. Esta potente aplicación de pago emplea más de diez tipos diferentes de algoritmos de nubes de puntos, inteligencia artificial y aprendizaje automático para promover el uso de LiDAR en toda la industria y resolver los problemas de aplicación de los usuarios al tiempo que desbloquea todo el potencial de sus datos de nubes de puntos. El software puede analizar y procesar datos masivos de nubes de puntos, se adapta a múltiples plataformas y dispositivos, y ofrece más de 400 funciones para un soporte eficiente de aplicaciones multisectoriales [33].

Luego de evaluar diferentes herramientas de software gratuitas, para el desarrollo de este trabajo se ha seleccionado FUSION como software de preprocesado LiDAR por su accesibilidad y funcionalidades. El software ha logrado gran robustez gracias a la ayuda de los desarrolladores, que han sido capaces de mejorar el programa y emplear nuevos métodos de análisis. Esto ha hecho que se convierta en un entorno fiable para la investigación y evaluación de resultados en estudios forestales. Además, para la visualización y análisis de resultados se utilizó también QGIS por su capacidad para la representación y superposición de varias capas de datos georreferenciadas.

2.3. Teledetección multiespectral

A continuación, se describen las características fundamentales de los sistemas de teledetección multiespectral a bordo de plataformas satelitales.

2.3.1. Imágenes multiespectrales

Cada objeto o superficie tiene su propia composición química y, en función de la longitud de onda, refleja la radiación recibida del sol de forma distinta en varios canales, lo que se conoce como firma espectral. Cada firma espectral es única, se corresponde con la respuesta espectral de los materiales al reflejar o emitir radiación electromagnética, y se puede caracterizar según la intensidad de su reflectancia, también conocida como albedo, y sus bandas de absorción específicas [34].

Por ejemplo, la vegetación se caracteriza por tener valores de reflectancia elevados en la zona del infrarrojo cercano, desde 0.65 μm a 1.3 μm , útiles para la distinción de masas vegetales y concentraciones de humedad; mientras que, en el infrarrojo medio, desde 1.3 μm a 1.4 μm , tiene curvas de menor valor, asociadas a la absorción de agua por las hojas, que son útiles para determinar humedad en las zonas de vegetación. Por otro lado, el suelo muestra una curva de

reflectancia más regular, y con una tendencia creciente en función de la longitud de onda, como se aprecia en la Figura 2.5 [35].

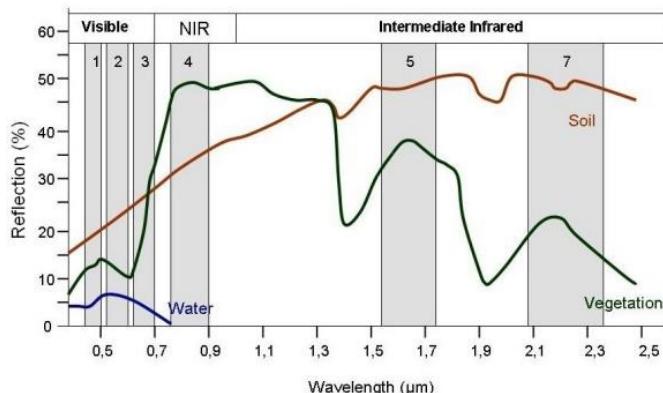


Figura 2.5. Curvas de reflectancia espectral de la vegetación, el suelo y el agua [35].

Las imágenes multiespectrales son aquellas que capturan los datos de la imagen dentro de rangos longitud de onda específicos a través del espectro electromagnético. Una imagen multiespectral divide la luz en un pequeño número de bandas espectrales, generalmente de 3 a 10 bandas por imagen. También existen las imágenes hiperespectrales, capaces de capturar cientos de bandas espectrales de forma continua. En una imagen multiespectral, cada píxel contiene valores de reflectancia o radiación en cada una de las bandas espectrales capturadas [36].

A continuación, en la Figura 2.6, se representan las diferencias entre la información que contiene una imagen RGB, una imagen multiespectral y una imagen hiperespectral:

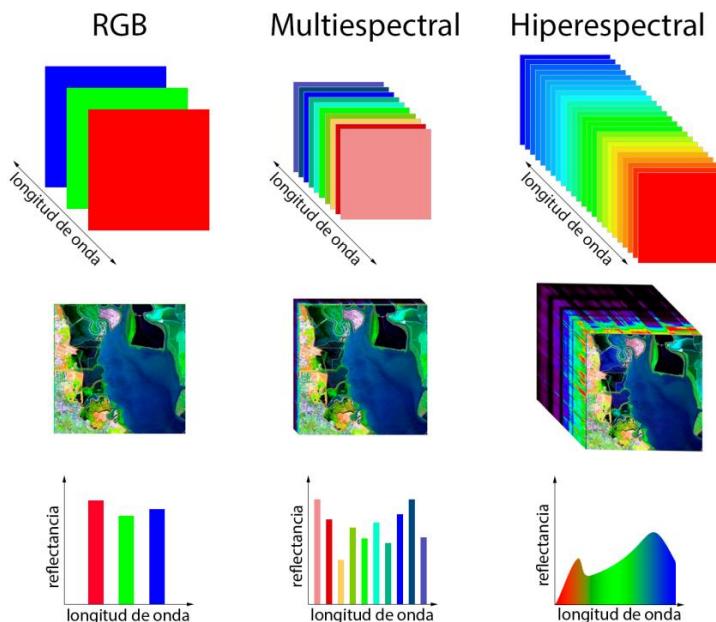


Figura 2.6. Diferencia entre imagen RGB, multiespectral e hiperespectral [37].

Una solución para la obtención de imágenes espectrales son los satélites de teledetección pasiva, que emplean sensores multiespectrales o hiperespectrales con múltiples combinaciones de bandas. Las características de éstos varían en función de su campo de aplicación, y su resultado final es la obtención de una representación de la Tierra donde cada punto imagen o píxel representa la intensidad de la radiación recibida por la porción de superficie que representa.

En general, la calidad del sensor se determina en base a: (a) su resolución espacial, referente al tamaño de superficie que representa cada píxel y determina el tamaño mínimo de un elemento distingible por el sensor; (b) su resolución espectral, que representa el número y anchura de bandas espectrales discriminables por el sensor; (c) su resolución radiométrica, que determina la sensibilidad del sensor, es decir, la mínima variación de energía detectable o número de bits empleados para codificar la información; y (d) su resolución temporal, que define el tiempo transcurrido entre dos exploraciones consecutivas [4].

2.3.2. Satélite WorlView-2

WordView-2 (WV-2) es el segundo satélite de nueva generación de *DigitalGlobe*. Construido por *Ball Aerospace*, fue lanzado el 8 de octubre de 2009, es el primer satélite comercial de alta resolución con ocho sensores espectrales, que van desde el rango visible al infrarrojo cercano. El satélite orbita a una altitud de 770 kilómetros con un periodo orbital de 100 minutos [38], [39].

Frente a otras plataformas satelitales de teledetección de alta resolución, WV-2 ofrece una serie de ventajas que llevan a la elección de éste como proveedor de las imágenes espectrales que se emplearan para el desarrollo del presente TFG. Dentro de las ventajas, destacan [38], [40]:

- **Mayor resolución espectral.** WordView-2 recoge imágenes multiespectrales de 8 bandas. Además de las cuatro bandas multiespectrales típicas (azul, verde, rojo, infrarrojo cercano 1), cuenta con cuatro bandas multiespectrales adicionales (azul costero, amarillo, borde rojo, infrarrojo cercano 2) que abren paso a multitud de aplicaciones.
- **Mayor agilidad.** Al igual que el satélite WorldView-1, está equipado con giroscopios de control del momento de fuerza que reducen el tiempo de giro, permitiendo tomar distintas y extensas áreas de imágenes multiespectrales en mismo pase orbital.
- **Mayor capacidad de revisita.** La mejora en cuanto agilidad y la altura a la que orbita (700 km) permiten que WV-2 tenga un periodo de revisita promedio de 1.1 días y una capacidad de exploración de hasta 975 000 km².

- **Mayor precisión.** Se introducen mejoras significativas en el sistema de geolocalización, aumentando la precisión geoespacial de las imágenes captadas.

WordView-2 es capaz de recoger imágenes pancromáticas (Pan) mono y estéreo con una resolución de 0.41 m (que no se utilizarán en este TFG) y 8 bandas multiespectrales a 1.64 m de resolución en el nadir (Figura 2.7). Cada sensor se centra en un rango concreto del espectro electromagnético que es sensible a una característica particular del terreno o a una propiedad de la atmósfera. Las cuatro bandas multiespectrales adicionales (azul costero, amarillo, borde rojo, infrarrojo cercano 2) mejorarán la segmentación y clasificación de superficies terrestres y acuáticas [38].

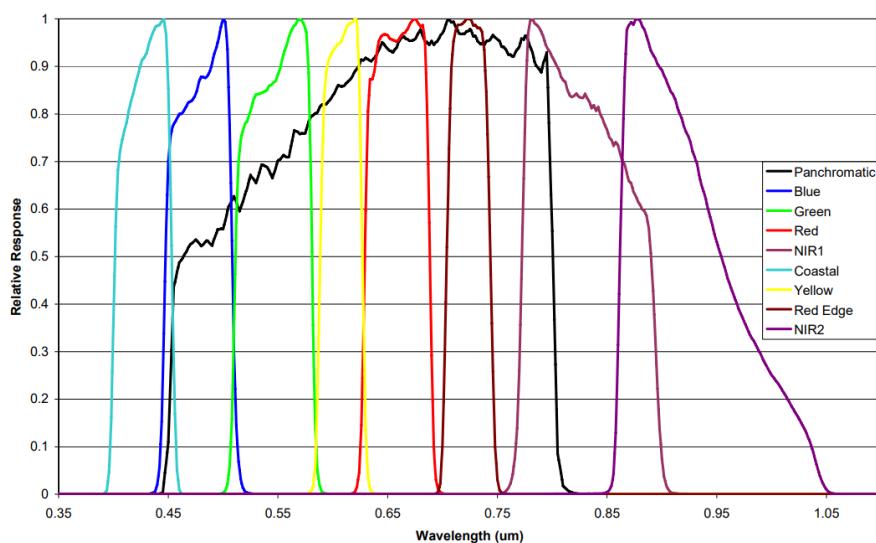


Figura 2.7. Bandas espectrales del WordView-2 [41].

Las ocho bandas multiespectrales son capaces de proporcionar una precisión de color excelente, permitiendo el desarrollo de nuevas aplicaciones. Las características principales de 4 nuevas bandas multiespectrales incorporadas por WV-2 son [38], [40]:

- Azul costero (400-450 nm). Por su alta absorción en la clorofila de las plantas, ayuda en la realización de análisis vegetativo. Menos absorbida por el agua, llegando a penetrar más, lo que hace que sea de gran utilidad para estudios batimétricos. Además, está muy influida por la dispersión atmosférica y puede emplearse para mejorar las técnicas de corrección atmosférica.
- Amarillo (585-625 nm). Importante para la clasificación vegetal por su capacidad de detectar la "amarillez" de la vegetación, tanto en la tierra como en el agua.
- Rojo borde (705-745 nm). Se encuentra centrada en el inicio de la parte de alta reflectividad de la respuesta de la vegetación. Relevante para valorar la salud de plantas y contribuir en la clasificación de la vegetación.

- Infrarrojo cercano 2 - NIR2 (860-1040 nm). Se solapa con la banda infrarrojo cercano 1 (NIR1) pero está menos afectada por la influencia atmosférica. Es muy útil en la clasificación de cubiertas terrestres debido a que tiene un alto valor de reflectividad en la vegetación terrestre. Permite un análisis más amplio de la vegetación y estudios de biomasa.

2.3.3. Herramientas de procesado de datos WorldView-2

Por medio del procesado de imágenes multiespectrales se extrae, almacena y manipula la información espacial y espectral contenida en las diferentes bandas de las imágenes. Las técnicas de procesamiento de imágenes multiespectrales se utilizan para mejorar la visualización, realizar análisis cuantitativos, identificar objetos y realizar tareas específicas según los objetivos que se quieran cumplir.

En el proceso de selección del software para el desarrollo del presente TFG el principal criterio fue la búsqueda de una herramienta por medio de la que se pudieran llevar a cabo todos los procedimientos propuestos, sin necesidad de emplear algún otro software auxiliar. Dentro de los softwares disponibles en el mercado, en base a estudios realizados anteriormente, se elige la herramienta *Environment for Visualizing Images* (ENVI).

ENVI es un software que ofrece un conjunto completo de herramientas de análisis de datos para extraer información de imágenes de manera rápida y sencilla. Estas herramientas están diseñadas para realizar tareas de procesado discretas y flujos de procesamiento guiados que incluyen calibración, reprocesamiento, corrección atmosférica, fusión de imágenes, ortorectificación y corregistro. Con ENVI, también es posible detectar cambios y anomalías, medir y extraer características, modelar características topográficas y mucho más [42].

Las herramientas de ENVI han sido desarrolladas y probadas por científicos expertos en teledetección. Su interfaz intuitiva y personalizable permite que usuarios de cualquier nivel de experiencia obtengan resultados expertos. ENVI puede trabajar con conjuntos de datos de cualquier tamaño, y ofrece herramientas automatizadas para visualizar y analizar fácilmente imágenes en detalle [42].

Capítulo 3. Procesado de datos de teledetección para el análisis forestal

En este capítulo se comentan las distintas correcciones y procesados que son necesarios aplicar a los datos LiDAR e imágenes multiespectrales del satélite WorldView-2 para ser empleados en tareas de análisis y obtención de resultados.

3.1. Introducción

El procesado se refiere al conjunto de técnicas y herramientas de corrección, filtrado y modelado empleadas con el fin de generar información útil de la superficie terrestre a partir de datos recolectados por sensores remotos de teledetección. Dichos datos pueden ser de diferentes tipos, como imágenes multiespectrales, datos LiDAR, radar o infrarrojos.

En el presente Trabajo de Fin de Grado, se ha explorado principalmente el uso de técnicas de procesado de datos LiDAR y multiespectrales para la identificación de variables forestales relevantes. Este proceso requiere de varias etapas, que incluyen la corrección de la geometría de los datos, la eliminación de ruido, la clasificación de los puntos y la creación de modelos digitales.

3.2. Preprocesado de datos LiDAR

El preprocesado de datos LiDAR incluye una serie de etapas que tienen como principal finalidad generar un modelo del dosel arbóreo dada la relevancia de la altura como parámetro fundamental para análisis e inventario forestal. Las etapas del preprocesado de datos LiDAR desarrollado en este TFG se muestran en la Figura 3.1.

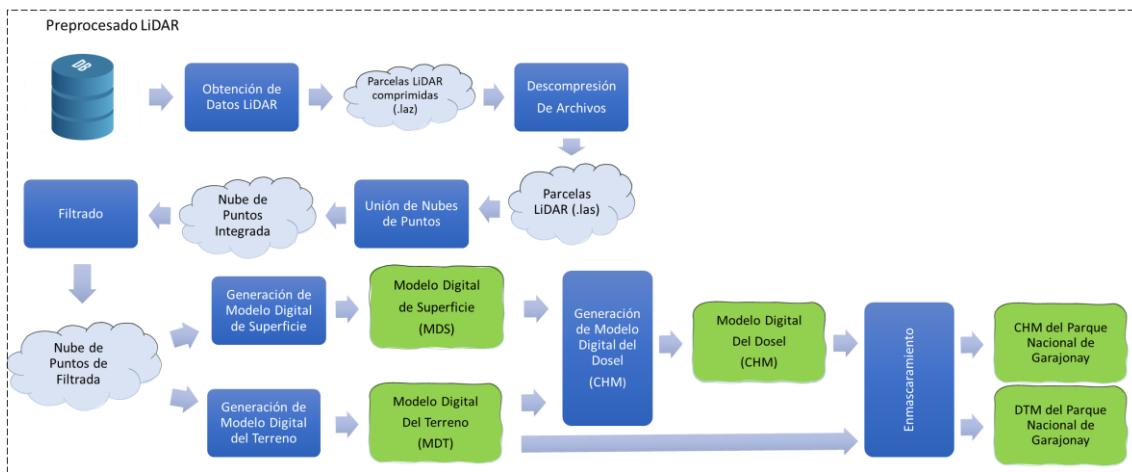


Figura 3.1. Diagrama de bloques del preprocesado de datos LiDAR.

➤ Obtención de datos LiDAR

Se descargan los ficheros LiDAR desde las páginas y bases de datos de alguno de los proveedores de archivos LiDAR existentes, ya sean públicos o privados, dentro de los que destacan los mencionados en la sección 2.2.2. Para el caso de este TFG, como se ha comentado anteriormente, se opta por el empleo de nubes de puntos LiDAR de GRAFCAN.

➤ Descompresión de archivos LiDAR

Producto del gran tamaño de las nubes de puntos 3D, la mayoría de los proveedores ofrecen los archivos LiDAR comprimidos, en formato LAZ. Por tal razón, la primera etapa de procesado pasa por descomprimir dichos archivos a formato LAS para su correcta aplicación, facilitando y mejorando las potencialidades de la nube de puntos y de las aplicaciones de procesamiento.

➤ Unión de nubes de puntos

Las nubes de puntos obtenidas representan parcelas que cubren una extensión de área relativamente pequeña. Si el interés es estudiar un área geográfica mayor, con el objetivo de modelar un estudio uniforme de dicha región, en esta etapa se unen las diferentes nubes de puntos de parcelas independientes que contienen parte de la región de interés en una única nube de puntos que abarque la totalidad del área de estudio. De esta forma se facilita el posterior tratamiento de datos en un único proceso. Además, aumenta la resolución espacial y vertical de la nube de puntos y nos permite obtener información más completa, precisa y detallada de la región. Esto es especialmente útil en áreas pequeñas y fragmentadas donde las parcelas individuales no proporcionan una imagen completa de la superficie terrestre.

➤ **Filtrado de las nubes de puntos**

Comúnmente encontramos en las nubes de puntos valores que no representan características del terreno u objetos de interés, debidos a factores internos o externos del sistema LiDAR. Dichos puntos se traducen en ruido dentro de nuestra nube de puntos, lo que puede afectar la calidad de los datos y su precisión, pudiendo llevar a resultados inexactos durante el análisis y procesado. Por lo tanto, la etapa de filtrado para la eliminación de ruido es vital dentro de este proceso de preprocesado para la obtención de resultados precisos y fiables.

Con tal objetivo, se suelen emplear filtros adaptativos que se desplazan por todo el archivo LiDAR eliminando los puntos con altura anormalmente altos o bajos con respecto al vecindario local. Solo se mantienen en el archivo de salida los retornos que tienen altitudes dentro del rango especificado, teniendo como resultado una nube de puntos limpia para su posterior análisis.

➤ **Generación del modelo digital del terreno (MDT)**

Para generar un MDT a partir de la nube de puntos LiDAR, es necesario realizar una serie de pasos. Según el proveedor, los puntos pueden estar ya clasificados, donde la clase 2 corresponde a los puntos del suelo. En función de esto, se emplea un algoritmo que distinga y categorice los puntos correspondientes al terreno. Una vez filtrados, se genera una malla mediante técnicas de interpolación. A partir de la malla, se puede producir el MDT mediante la interpolación de los valores de altitud de los vértices de la malla.

Como se ha visto con anterioridad, no todos los proveedores clasifican las nubes 3D. En estos casos, será necesario utilizar algoritmos de clasificación para la identificación y extracción de los retornos que corresponden a puntos de suelo.

El resultado es un modelo que representa la superficie del terreno con una alta resolución espacial y vertical, que permite realizar análisis topográficos detallados y precisos (Figura 3.2.). La obtención del MDT es vital para normalizar la nube de puntos original y poder estimar la altura real de los objetos. En el presente TFG, se nos permitirá obtener la altura real de las masas forestales para realizar análisis de la vegetación de la zona.

➤ **Generación del modelo digital de superficie (MDS)**

Se genera el MDS a partir de la nube de puntos original, definiendo un tamaño de celda en función de la densidad de puntos. En cada celda, se asigna el valor de los puntos con la elevación máxima para obtener una superficie continua. El resultado es un archivo ráster y la ventaja

principal respecto a la nube de puntos inicial es que se interpolan los espacios vacíos entre los puntos de la nube, dando lugar a una representación continua de la superficie.

➤ **Generación del modelo digital del dosel (CHM)**

El modelo digital de superficie normalizado con respecto al terreno (nMDS), conocido también en el ámbito forestal como modelo digital del dosel (CHM, del inglés *Canopy Height Model*), se genera teniendo como referencia el MDT obtenido anteriormente. Por una parte, se puede obtener mediante la diferencia entre los valores de MDS y MDT. Por otro lado, también se puede obtener a partir de la nube de puntos original y el MDT, mediante el modelado de la nube de puntos producto de la diferencia de éstos. El CHM resultante es un modelo ráster que representa las elevaciones del dosel arbóreo. Este modelo es, finalmente, el resultado de interés a partir del cual se puede analizar la altura del arbolado.

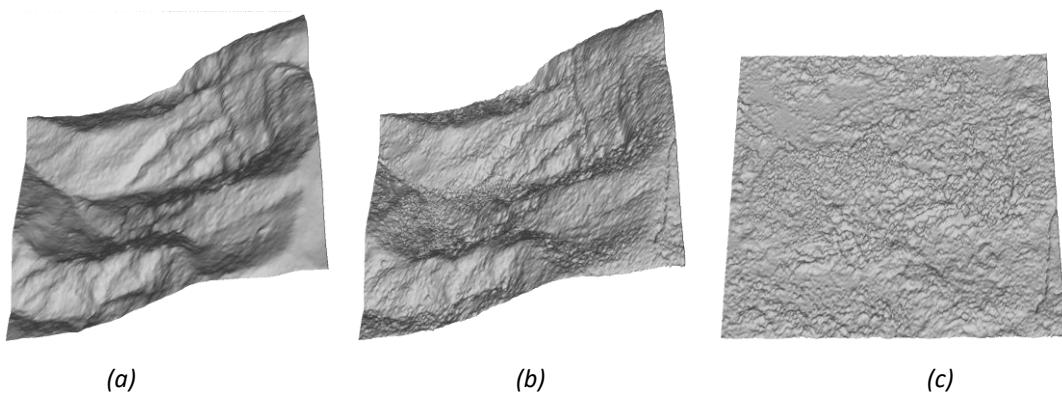


Figura 3.2. Ejemplo de: (a) MDT, (b) MDS y (c) CHM.

Tanto el MDS como el CHM son fundamentales en la obtención de métricas y análisis de estado de la cubierta vegetal.

➤ **Enmascaramiento**

Para analizar solamente la región de interés, o en aquellas parcelas que haya datos de campo, una vez obtenidos los modelos digitales, se enmascaran para obtener el mapa de valores de dicha región. Esto facilita el análisis y procesamiento que se realice a partir de los modelos generados. Además, será de gran utilidad en la superposición de capas para análisis visuales.

3.3. Preprocesado de datos multiespectrales

Las imágenes multiespectrales miden las características espaciales y espectrales de un objeto mediante imágenes de diferentes longitudes de onda. La radiación reflejada desde el objeto es captada por el sensor y convertida en un valor digital, que representa un píxel de la imagen obtenida. Cada píxel es un vector de valores que especifican las intensidades en una ubicación

(x,y) en bandas diferentes. El vector se conoce como espectro de píxel y define la firma espectral del píxel situado en (x,y). El resultado final será una matriz tridimensional de valores que son representados en los píxeles de la imagen obtenida [43].

Los valores de reflectividad de cada píxel captado por el sensor están distorsionados debido a factores como el ruido del sensor, los efectos atmosféricos y la baja resolución [43].

En este apartado se definen los métodos de preprocesado que se deben aplicar a las imágenes con el fin de corregir posibles errores durante la toma de los datos (Figura 3.3). Para ello se realizan una serie de correcciones. El resultado serán imágenes multiespectrales corregidas a partir de las cuales se podrán obtener resultados más reales y precisos. En el presente TFG se ha partido de imágenes multiespectrales de muy alta resolución del satélite WorldView-2.



Figura 3.3. Diagrama de bloques del preprocesado de imágenes multiespectrales.

➤ **Calibración radiométrica.**

La radiometría se refiere a la transferencia de radiación óptica entre una fuente objetivo y su fondo asociado, a través del medio intermedio, a un receptor o detector de energía radiante óptica. El objetivo general de la calibración de la instrumentación electroóptica es obtener una relación funcional entre el flujo incidente y la salida del instrumento [44].

Los sistemas electroópticos miden la radiancia espectral detectada por el sensor a una longitud de onda determinada y convierten este valor en un número digital. Estos valores se pueden ver afectados tanto por las características propias del detector como por las perturbaciones causadas por la atmósfera. Para corregir los posibles errores en los niveles digitales de las imágenes se llevan a cabo una serie de correcciones radiométricas [44].

La calibración radiométrica relativa y la corrección son necesarias porque una escena uniforme no crea una imagen uniforme en términos de números digitales brutos (DN). Las principales causas de la falta de uniformidad incluyen la variabilidad en la respuesta del detector, la variabilidad en la ganancia electrónica, el desplazamiento, el desvanecimiento de la lente y la contaminación por partículas en el plano focal.

Los datos brutos de los detectores de todas las bandas son corregidos radiométricamente en las primeras etapas de generación de productos WorldView-2. Esta corrección incluye sustracción del desfase oscuro y una corrección de la no uniformidad. De esta forma, solo será necesario realizar una calibración radiométrica a las imágenes multiespectrales procedentes del satélite WV-2 [45].

La calibración del instrumento requiere un conjunto funcional de datos sobre las características espectrales, espaciales, temporales y de polarización del instrumento para las cuales se debe investigar la linealidad y el nivel de ruido de fondo en el instrumento [44].

En definitiva, los números digitales de las imágenes multiespectrales se calibrarán radiométricamente para, a partir de los valores de las ganancias y offset de cada banda, convertirlos en valores reales de reflectancia útiles para construir representaciones cuantitativas espectrales, espaciales y temporales del entorno [46].

➤ **Corrección atmosférica.**

En general, las metodologías empleadas para obtener los valores de reflectividad a partir de los niveles digitales no tienen en cuenta la influencia atmosférica, asumiendo, además, terreno plano y observación vertical. Esto trae consigo que los índices de reflectividad obtenidos no sean característicos de la superficie real, limitando los resultados que a partir de ellos se podrían obtener. Por tales razones, será necesario desarrollar un modelo que tenga en cuenta la influencia atmosférica.

La corrección atmosférica es trascendental en el procesamiento de los datos de teledetección adquiridos desde plataformas satelitales debido a la interacción de la atmósfera con el flujo radiante entre sensor y plataforma. Su propósito es eliminar o disminuir la influencia de la dispersión y absorción de moléculas atmosféricas y aerosoles en la reflectancia del objeto captado [47].

Basado en estudios realizado previamente, para la realización del presente TFG se optará por emplear el algoritmo FLAASH (*Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes*) para modelar los efectos de la atmósfera sobre los datos multiespectrales.

FLAASH es un modelo avanzado de corrección atmosférica basado en los principios del código transferencia radiativo MODTRAN4. Su principal objetivo es eliminar los efectos atmosféricos causados por la dispersión y absorción en los valores de radiancia, para obtener así los valores de reflectancia a nivel de la superficie. Este algoritmo puede ser utilizado para todas las bandas de frecuencia del espectro visible, el infrarrojo cercano y el infrarrojo de onda corta.

➤ **Ortorectificación.**

Las imágenes de satélites están compuestas por píxeles referenciados según sus números de columnas y filas, es decir, no están georreferenciadas. Además, son sensibles a distorsiones geométricas propias del proceso de registro de datos y de la forma y rotación de la Tierra [48].

La corrección geométrica es el proceso de subsanar las distorsiones de una imagen y transformarla para que recupere su geometría original de forma que se adapte a las propiedades de un mapa. Esto permite asignar coordenadas a cada punto de la imagen según una proyección cartográfica elegida por el operador [48].

A pesar de que los proveedores procesan las imágenes y son capaces de eliminar la mayor parte de las distorsiones, nunca se eliminan totalmente y será necesario aplicar correcciones geométricas en función de las características específicas del área que se desea estudiar y los datos disponibles [48]. Para el caso de estudio del presente TFG, debido a la complejidad de la ortografía del Parque Nacional de Garajonay y la visión oblicua del satélite WV-2, se valora realizar la ortorectificación de las imágenes multiespectrales adquiridas.

La ortorectificación tiene el objetivo de corregir los errores de perspectiva y para ello utilizará un modelo digital de elevación de la zona de interés.

3.3.1. Índices de vegetación

Los índices de vegetación (IVs) que se pueden obtener a partir de datos multiespectrales son algoritmos simples y eficaces para realizar evaluaciones cualitativas y cuantitativas de la cobertura vegetal y su vigorosidad [49].

Los índices de vegetación utilizan la información de reflectividad de la vegetación en diferentes longitudes de onda para destacar o detectar características específicas de ésta. Estos índices se generan combinando las mediciones de reflectividad en diferentes bandas espectrales, cada índice tiene su propia fórmula y resalta una propiedad particular de la vegetación [50].

La reflectancia espectral de las especies vegetales varía según el tipo de planta, el contenido de agua de los tejidos, la estructura foliar de sus hojas, la concentración de clorofila y el ángulo de incidencia de la radiación solar, entre otros factores. De este modo, la respuesta espectral de las plantas posee una serie de características que la diferencian respecto a otros materiales naturales, como suelos y cuerpos de agua (Figura 3.4), dentro de las que destacan:

- Existencia de una baja reflectancia entre las longitudes de onda correspondientes al azul y el rojo.

- La clorofila refleja la radiación absorbida en dicho margen en parte del rango infrarrojo.
- Distintas especies sanas no poseen una curva de reflectancia idéntica.
- En el intervalo donde ocurre la transición del rojo al infrarrojo cercano se concentra gran parte de la información del estado de la estructura de la planta, lo cual es útil para diferenciar especies y su vigor vegetal.

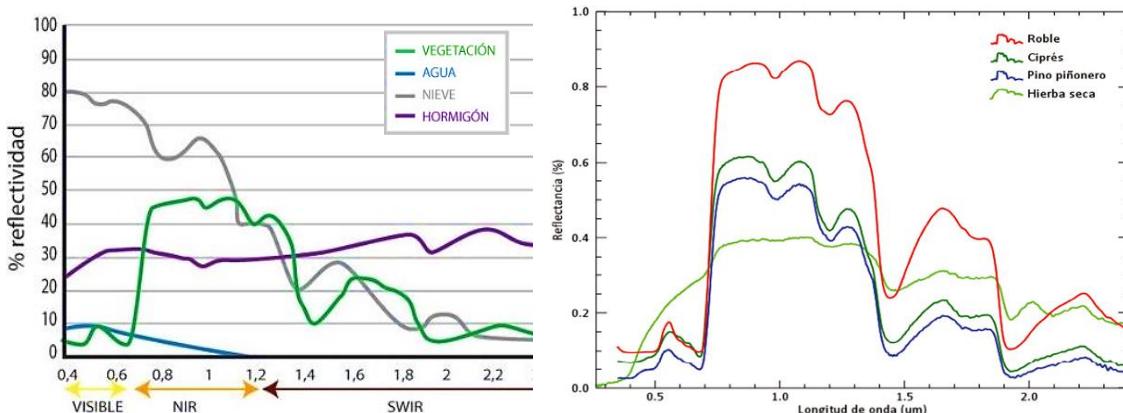


Figura 3.4. Firmas espectrales de distintos elementos [51].

En el presente TFG se propone el estudio y empleo de tres índices fundamentales para estimaciones del estado de la salud vegetal, estos son: (a) el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, del inglés *Normalized Difference Vegetation Index*); (b) el Índice de Vegetación Mejorado (EVI, del inglés *Enhanced Vegetation Index*); y (c) y el índice de Vegetación de Amplio Rango Dinámico (WDRVI, del inglés *Wide Dynamic Range Vegetation Index*). A continuación, se caracterizan los índices de vegetación propuestos.

➤ **Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)**

Representa uno de los índices más empleados en la actualidad por su capacidad para delinear rápidamente la vegetación y el estrés vegetativo. Es de gran utilidad para estimar diversas propiedades de la vegetación, dentro de las que destacan la concentración de clorofila en las hojas, la cobertura y el estrés vegetales. Se calcula como la relación normalizada entre las bandas roja (RED) e infrarroja cercana (NIR) (Ecuación 3.1). Las regiones RED y NIR son las de mayor absorción y reflectancia de la clorofila, que varía en para cada tipo de especie, por lo que los resultados que se generan no son completamente óptimos [49], [52], [53].

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

Al ser un índice normalizado, sus valores varían de -1 a 1, teniendo valores positivos entre 0 y 1 para la vegetación. Se considera vegetación vigorosa rangos de NDVI de entre 0.2 y 0.8, representando mayor vigorosidad mientras mayor sea este valor. Sin embargo, NDVI es sensible

a los efectos del brillo del suelo, el color del suelo, la atmósfera, la sombra de nubes y del dosel de las hojas, y requiere calibración. Además, se satura si existe una alta densidad vegetal [52]–[54].

➤ ***Enhanced Vegetation Index (EVI)***

EVI, útil para estimar el verdor de la vegetación, sigue la misma línea de NDVI. Dadas las limitaciones del NDVI, surge el índice de Vegetación Mejorada con el objetivo de corregir simultáneamente las perturbaciones existentes en áreas con alta densidad de vegetación y los efectos del suelo y la atmósfera. Se introdujeron en la ecuación la constante 1 para ajustar el ruido de fondo originado por el suelo, las constantes 6 y 7.5 para la corrección de efectos atmosféricos, y la banda azul (BLUE) (Ecuación 3.2) [49], [55].

$$EVI = 2.5 * \frac{NIR - RED}{(NIR + 6 * RED - 7.5 * BLUE + 1)} \quad (3.2)$$

Al igual NDVI, su valor está normalizado y se entiende como vegetación vigorosa valores que comprendidos entre 0.2 y 0.8. Es importante enmascarar las fuentes de brillo antes de procesar la imagen o la banda azul podría saturar el resultado en algunos píxeles [54], [55].

➤ ***Wide Dynamic Range Vegetation Index (WDRVI)***

WDRVI mejora el rango dinámico de NDVI al aplicar un nuevo coeficiente de ponderación (α) a la reflectancia en el infrarrojo cercano (Ecuación 3.3), donde α varía de 0.1 a 0.2. Experimentos han mostrado que un valor de $\alpha = 0.2$ es generalmente efectivo para cálculos de WDRVI, en nuestro caso también asumiremos ese valor [49], [56].

$$WDRVI = \frac{\alpha * NIR - RED}{\alpha * NIR + RED} \quad (3.3)$$

NDVI se acerca a la saturación a medida que la fracción de vegetación y el índice de área foliar (LAI) aumentan, mientras que WDRVI ofrece sensibilidad ante un rango más amplio de fracciones de vegetación y cambios de LAI. Al mejorar el rango dinámico empleando las mismas bandas que el NDVI, el WDRVI permite una caracterización más robusta de las características fisiológicas y fenológicas de los cultivos en condiciones de alta biomasa [49], [56].

3.4. Clasificación de datos de teledetección

La clasificación de imágenes espectrales es el proceso mediante el cual se emplean sus valores de reflectancia en una o más bandas espectrales, para identificar características comunes y clasificar todos los píxeles de la imagen en función de la informaciónpectral [57], [58].

Como se comentó en el apartado anterior, cada especie se caracteriza por tener una firmapectral única. Los individuos de la misma especie se caracterizan por un conjunto limitado de propiedades biofísicas y bioquímicas comunes, lo que permite la diferenciación de individuos de otras especies a través del análisis de similitudes y diferencias en sus firmas espectrales.

El potencial de los sensores multiespectrales para recopilar información sobre la mayor parte del espectro electromagnético empleable para la observación terrestre ha impulsado su utilidad para el análisis de la biodiversidad. En este contexto surge el término de especiesspectrales, remotamente detectables, dentro de las unidades de píxeles de una imagenespectral [59].

En función de la resolución espacial del sensor y la heterogeneidad espacial del ecosistema, los píxeles pueden contener varias especies, dificultando la identificación precisa de especies. Dependiendo de la resoluciónpectral del sistema de teledetección y la similitud de la vegetación, la detección automática de píxeles que comparten una firma spectral similar dentro de una imagen no coincide necesariamente con el patrón de distribución real de una especie dada, sino que puede reflejar el patrón de distribución espacial de un grupo de especies que tienen propiedades comunes [59], [60].

Las técnicas de clasificación de imágenes pueden dividirse, a rasgos generales en técnicas supervisadas y no supervisadas. En este TFG se propone el estudio y empleo de métodos supervisados para el desarrollo del proceso de clasificación [57].

➤ Clasificación supervisada

En la clasificación supervisada es necesario tener conocimiento sobre el área de estudio para la selección de muestras que representen las características que se desean detectar. Estas muestras se conocen como muestras de entrenamiento y son muy importantes ya que a partir de ellas se ajustan algoritmos de clasificación de la imagen [61].

El procedimiento a seguir se divide en tres fases. La primera es la selección de las áreas de entrenamiento dentro de la imagen en busca de proporcionar toda la información posible sobre las características de las clases que se desean identificar. En la segunda etapa se genera el archivo

de firma, que almacena toda la información espectral obtenida a partir de las zonas de entrenamiento.

Por último, llega la fase de clasificación. Se aplica el algoritmo de clasificación entrenado para agrupar los píxeles con características espetrales más similares. Existen varios algoritmos para llevar a cabo esta tarea, uno de los más usados calcula la probabilidad estadística de que cada píxel pertenezca a cada clase. A continuación, los píxeles se asignan a la clase asociada con la probabilidad más alta. El resultado será una imagen, en la que cada píxel se ha asignado a una de las clases definidas [58], [62], [63].

Dentro de los distintos algoritmos de clasificación, se emplearán el de SVM (*Support Vector Machine*) y el SAM (*Spectral Angle Mapper*) que en estudios anteriores demostraron mayor precisión. Por su parte, el SVM es un algoritmo de aprendizaje de maquina avanzado que identifica con exactitud las coberturas del suelo, además de ser bastante robusto a la cantidad de datos y de regiones de entrenamiento. Por otro lado, el SAM mide la similitud espectral calculando el ángulo entre los dos espectros en un espacio dimensional igual al número de bandas; es relativamente insensible a los efectos de iluminación y albedo cuando se utiliza en datos de reflectancia calibrados [64], [65].

Previo a la clasificación, es conveniente realizar un análisis de la separabilidad de las clases definidas para evitar errores en la clasificación y evaluar, a priori, la viabilidad y precisión de la clasificación. Se entiende por separabilidad a la capacidad de las firmas espetrales de las diferentes clases para discriminarse entre sí. Para ello, se pueden emplear técnicas como la visualización de firmas espetrales y el cálculo de estadísticas descriptivas.

Uno de los métodos más destacados para estudiar la separabilidad es el de divergencia estadística. A mayor divergencia mayor índice de separabilidad habrá entre clases. También se puede medir la separabilidad por medio de la distancia de Jeffries-Matusita (JM), que se puede definir como la diferencia de distribuciones de probabilidad entre un conjunto de clases [66]–[68].

Si las clases siguen una distribución normal, se siguen las expresiones [68]:

$$J_{ij} = 2 \left(1 - e^{-B_{ij}} \right) \quad (3.4)$$

$$B_{ij} = \frac{1}{8} (m_i - m_j)^T \left[\frac{C_i + C_j}{2} \right]^{-1} (m_i - m_j) + \frac{1}{2} \ln \left[\frac{(C_i + C_j)/2}{|C_i C_j|^{1/2}} \right] \quad (3.5)$$

donde B_{ij} es la distancia de Bhattacharyya, m_i y m_j son los vectores de medias de categorías, C_i y C_j son las matrices de varianza y covarianza de las clases i y j , y $(\cdot)^T$ es la matriz traspuesta.

La distancia JM esta acotada entre 0 y 2, valores a partir de 1.8 se consideran como un valor adecuado de separación de las firmas espectrales de las clases consideradas para su precisa clasificación. Por el contrario, si el valor es inferior a 1.8 indica que dos clases son bastante similares y puede que no sean discriminables a partir de la información espectral.

En la Figura 3.5 se muestra el ejemplo de un mapa clasificado a partir de la definición de las clases bosque, pastos, suelo desnudo, edificación, río y lecho de río.

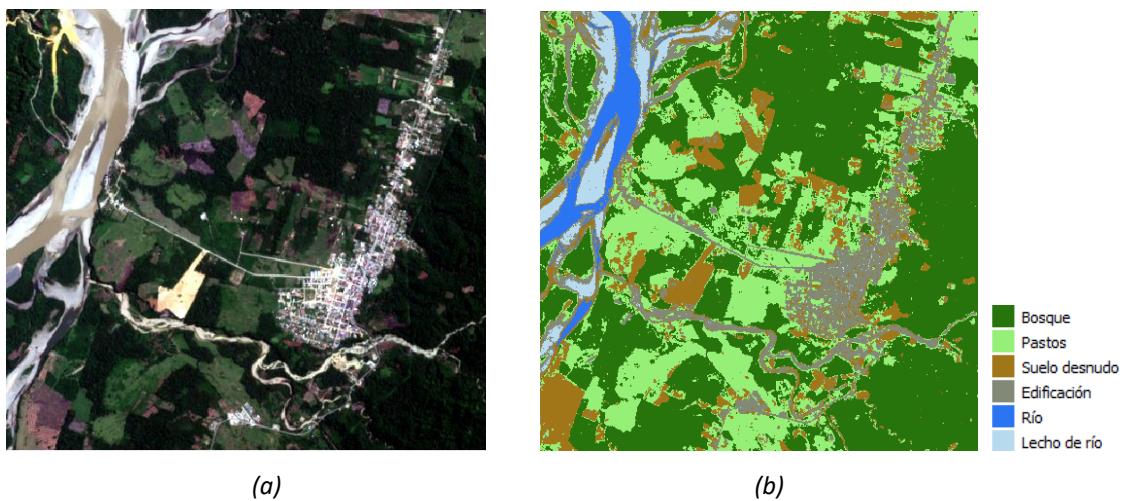


Figura 3.5. (a) Mapa sin clasificar. (b) Mapa clasificado.

Capítulo 4. Análisis del estado de salud vegetal en el Parque Nacional de Garajonay

En este capítulo se describen los procedimientos llevados a cabo para el análisis de la salud vegetal del Parque Nacional de Garajonay. Se aplican distintas técnicas de procesado para la obtención de mapas de vigorosidad a partir de las imágenes multiespectrales del satélite WorldView-2 y la detección de zonas desvitalizadas a partir de datos LiDAR.

4.1. Zona de estudio

El Parque Nacional de Garajonay (PNG) se encuentra situado en la isla de La Gomera, en las Islas Canarias, España (Figura 4.1.). Fue declarado Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO en 1986. Cuenta con una superficie de 3984 hectáreas y es conocido por su densa selva de laurisilva. Garajonay se extiende entre los 800 y los 1487 m de altitud, donde se halla la máxima altura de la isla. De origen volcánico, la ausencia de actividad eruptiva en La Gomera durante los últimos 2 millones de años, y un clima que propicia la erosión, han creado un relieve surcado por profundos barrancos [69].



Figura 4.1. (a) Ortofoto de la región del PNG, en la isla de la Gomera. (b) Vista de la zona norte del Parque [70].

Una de las características más notables es su clima húmedo y neblinoso, que contribuye a la formación de la selva de laurisilva. Esta especie vegetal es trascendental en este ámbito geográfico, ya que los bosques semejantes están ubicados en regiones muy lejanas, como el

sureste asiático o las montañas del húmedas del trópico. Además, la laurisilva es crucial como productora de agua en una isla de características áridas. Su capacidad para retener y almacenar agua al paso de las masas de aire con humedad es fundamental en la recarga hidrológica, lo que hace que por el Parque Nacional fluya la red de corrientes de agua permanente más amplia y mejor conservada de Canarias.

En el PNG habita una gran biodiversidad de flora y fauna, muchas de las cuales son especies endémicas de la isla de La Gomera. Entre las especies vegetales más destacadas se encuentran el brezo, el fayal-brezal, la faya, el barbusano, el tilo y el viñátigo, mientras que entre las especies animales se encuentran el lagarto gigante de La Gomera, el murciélagos orejudo canario, la paloma rabiche y el pinzón azul de Gran Canaria [69], [71].

El PNG es un importante bosque referente del ecosistema canario, con una gran biodiversidad. Sin embargo, como ocurre con muchos ecosistemas naturales, también se enfrenta a riesgos y desafíos que deben ser abordados para garantizar su supervivencia y preservación a largo plazo.

Uno de los principales problemas es la existencia de áreas degradadas que corresponden a antiguas plantaciones forestales con especies exóticas o matorrales que reemplazan al bosque original. También hay una gran cantidad de especies exóticas invadiendo el Parque debido a las condiciones climáticas favorables, algunas de las cuales tienen un comportamiento invasor. Otra preocupación importante es la existencia de un gran número de especies amenazadas; así, el Parque y su entorno son considerados la segunda área de España con mayor número de especies amenazadas. La presión humana también aumenta debido al turismo creciente en la isla y la existencia de una red viaria importante dentro del Parque complica el control de la visita y la conservación del ecosistema [72].

A pesar de la influencia de los factores anteriores, es el incendio forestal el factor que representa el mayor riesgo para la conservación del PNG. A pesar de que las propiedades vegetales del PNG no favorecen la propagación de fuego, factores como la sequía del verano propician el inicio y propagación del fuego. Tal es el caso del incendio forestal ocurrido en 2012 que afectó hasta 741,7 hectáreas que representan el 18,8 % de su territorio. Este suceso provocó pérdidas casi irreversibles en las zonas peor conservadas del parque y afectó gravemente el porcentaje de superficie de monteverde (laurisilva y Fayal-brezal). La Figura 4.2. representa las zonas del PNG afectadas por el incendio, según la severidad de los daños causados [72], [73].

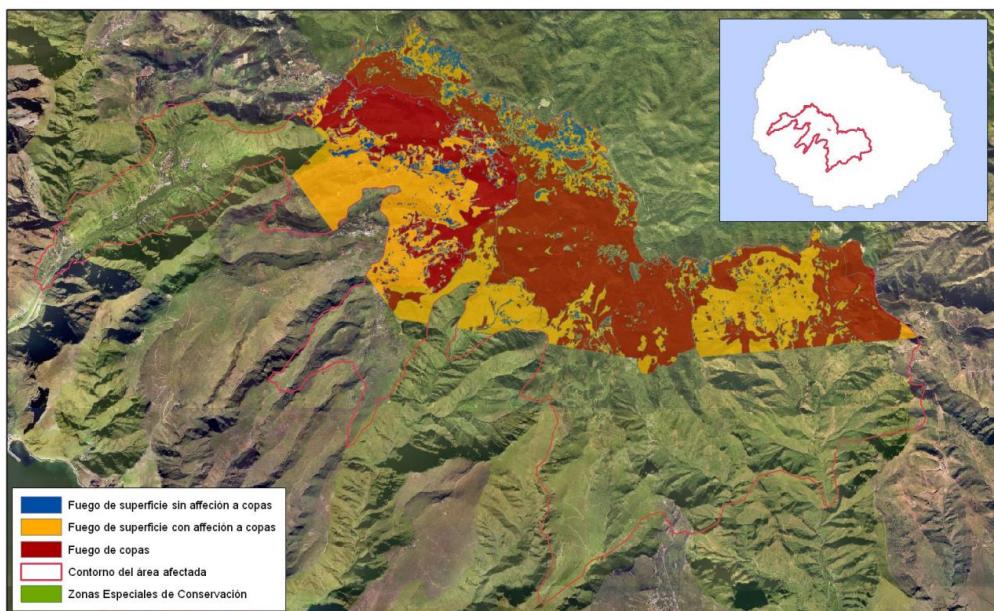


Figura 4.2. Valoración de los diferentes niveles de severidad en el área afectada por el incendio en el Parque Nacional de Garajonay y la Zona Periférica de protección [73].

Por otro lado, la Gomera es uno de los territorios de Europa con mayor número de plantas amenazadas por kilómetro cuadrado y gran parte de dicha flora se ubica en el PNG y su entorno. En tales circunstancias, la investigación es trascendental como parte de la gestión ambiental efectiva. Actualmente, se está llevando a cabo un seguimiento ecológico que incluye una red permanente para recopilar datos con el fin de comprender cómo funciona y evoluciona el ecosistema a largo plazo. Como parte de este programa, se lleva a cabo esta investigación en la región que abarca el PNG [69], [72].

4.2. Datos de campo del PNG

Los datos de campo corresponden a información recolectada directamente en el terreno durante estudios, investigaciones o inventarios forestales realizados por los responsables de conservación del Parque. Su obtención implica técnicas de muestreo, observación directa y medición. Sus características claves son la actualidad, especificidad, el contexto geográfico y cierta subjetividad inherente a la recopilación. Estos datos son fundamentales para desarrollar distintas etapas dentro del proceso de análisis forestal, tales como la validación, investigación, planificación y toma de decisiones en relación con los recursos; proporcionando información detallada y actualizada directamente desde el entorno de estudio.

Durante el proceso de inventariado desarrollado en el PNG se han tomado dos tipos de datos de campos, distribuidos en parcelas. Estos se dividen en datos de parcelas detalladas y datos de parcelas globales. Específicamente, se dispone de:

- 11 parcelas detalladas, de forma rectangular, distribuidas aleatoriamente por todo el parque. Estos inventarios se realizaron durante 2011 (3 parcelas), 2017 (2 parcelas), 2019 (5 parcelas) y 2020 (1 parcela).
- 58 parcelas globales, distribuidas de forma circular por todo el parque a una distancia promedio de 500 metros desde el centro de cada parcela. La toma de muestras tuvo lugar entre enero de 2021 y marzo de 2023.

En la figura 4.3. se muestra la distribución espacial de la totalidad de parcelas muestreadas en el PN de Garajonay. Para su representación se emplearon marcadores circulares en las coordenadas referentes al centro de cada parcela. Identificadas con marcadores de color amarillo se encuentran las parcelas de nivel detallado. Por otro lado, las parcelas de nivel globales se identifican con marcadores de color rojo.

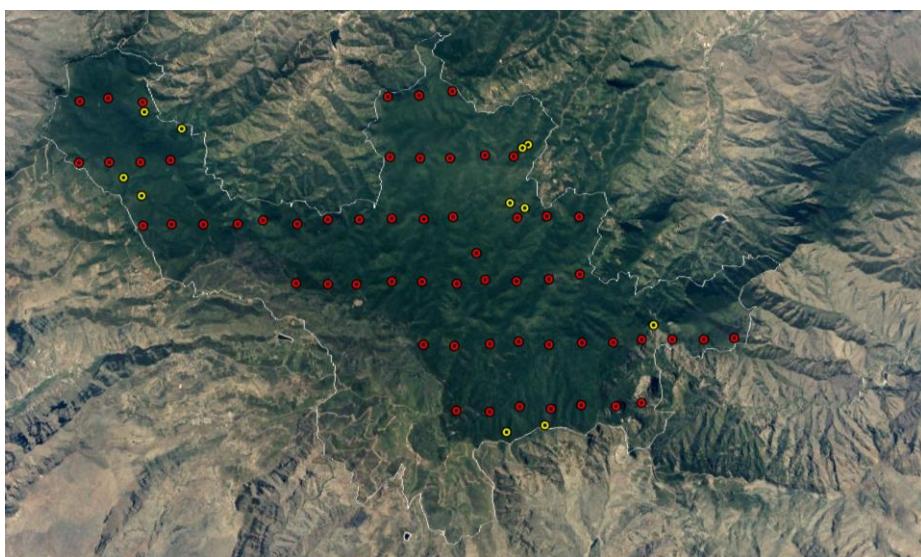


Figura 4.3. Parcelas de campo globales (marcadores rojos) y detalladas (marcadores amarillos).

En las parcelas de nivel detallado se tiene información de especie, altura total, altura de base de copa, diámetro normal y vigorosidad de cada uno de los árboles existentes en su superficie. Además, se cuenta con información de ubicación en coordenadas UTM, altitud, superficie, dimensiones, orientación y situación geográfica, pendiente, precipitación media anual, precipitación horizontal anual, temperatura media anual, temperatura media máxima, geología, edafopaisaje, erosión hídrica, compactación de la superficie, profundidad de suelo y retención de agua en el suelo, de cada parcela.

Las parcelas globales se distribuyen circularmente, y en cada parcela circular hay 4 subparcelas circulares con los siguientes radios: 5 m, 10 m, 15 m y 25 m. En la subparcela circular de 5 m de radio se miden todos los pies mayores (árboles) de todas las clases diamétricas (CD) (altura > 2,5

Capítulo 4. Análisis del estado de salud vegetal en el Parque Nacional de Garajonay

m y diámetro >7,5 cm). En la subparcela de 5 a 10 m se contabilizan los pies de las CD 2, 3 y 4 (diámetro ≥ 12,5 cm). En la subparcela de 15 m se contabilizan las CD 3 y 4 (diámetro ≥ 22,5 cm); y en la subparcela de 20 a 25 m sólo la CD 4 (diámetro ≥ 42,5 cm). Luego, aplicando unos factores de expansión para cada clase diamétrica se obtienen los datos de estructura en 1 hectárea, que es la unidad de medida. Para cada especie detectada se recogen datos de: número de pies total, alturas máxima, media y mínima, biomasa y desviación estándar, entre otras.

4.3. Análisis con datos LiDAR

Tomando como entrada los datos LiDAR del GRAFCAN del 2017, se han llevado a cabo las distintas etapas de la cadena de preprocesado definidas en el anterior capítulo (Figura 4.4.). Se ha realizado un trabajo de evaluación y estimación de las mejores estrategias en cada procesamiento realizado a los datos LiDAR para obtener el modelo digital del dosel.

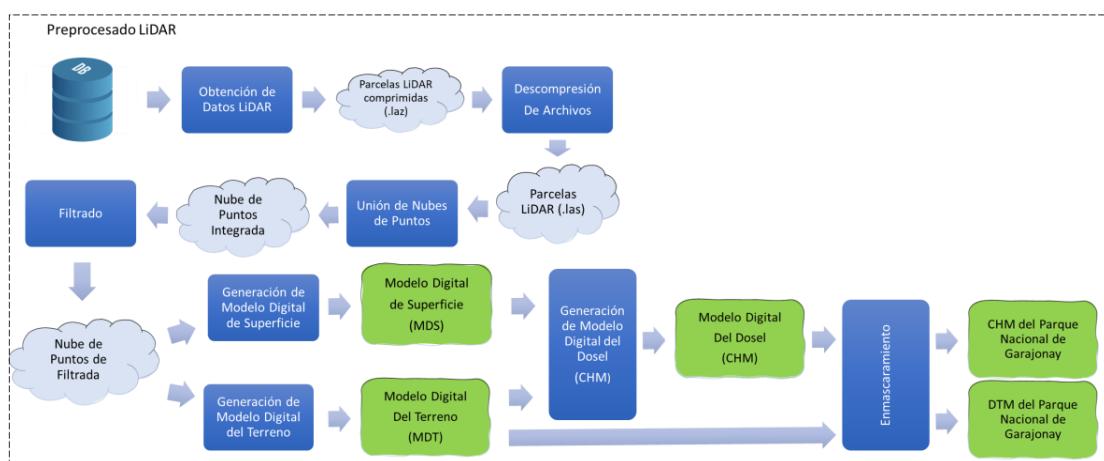


Figura 4.4. Diagrama de bloques del preprocesado LiDAR.

Una vez obtenido el modelo digital del dosel, a partir de la nube de puntos inicial, se deberán validar los resultados con los datos de campo para asegurar su precisión. Además, a partir del muestreo en campo se extraerán características para analizar el estado de la vegetación mediante la identificación de zonas desvitalizadas. En la Figura 4.5. se presenta la metodología desarrollada para la extracción de la información forestal.

En el Anexo A.2 se incluyen los comandos empleados para utilizar las herramientas de FUSION para el preprocesado.

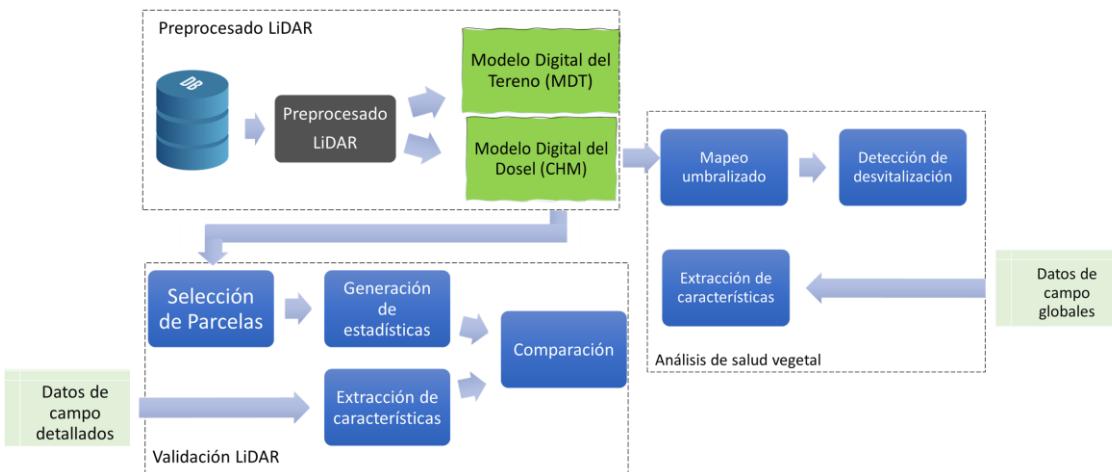


Figura 4.5. metodología para el análisis de la salud vegetal del PNG.

4.3.1. Preprocesado LiDAR

➤ Obtención de datos LiDAR

Como se ha indicado con anterioridad, se emplearán los datos ofrecidos por GRAFCAN, que son nubes de puntos LiDAR comprimidas en formato LAZ.

El proceso de toma de muestras es llevado a cabo mediante vuelos con un sensor LiDAR que proporciona una densidad media de 1,20 puntos por metro cuadrado, con una precisión aproximada de 0.60 m en planimetría y 0.20 m en altimetría. El último vuelo disponible tuvo lugar entre el 31 enero y el 4 de febrero de 2017. El sistema utilizado puede capturar hasta 4 retornos por cada pulso láser, y cuenta con una cámara fotográfica digital para adquisición instantánea de imágenes. Estos archivos representan parcelas de 1x1km de extensión. En la Figura 4.6. se muestra la distribución geográfica de parcelas LiDAR de GRAFCAN en el territorio de la Gomera [25], [74].

Los datos brutos captados por el sensor son sensibles a diversas fuentes de error tanto sistemáticas como aleatorias. Para ello, se realizaron correcciones de cabeceo, balanceo, constante de torsión, rango, entre otras. De dicho procesado se obtuvieron ficheros con información de geolocalización, altimetría, intensidad, número e información de retorno, ángulo de escaneo y marca de tiempo de cada uno de los puntos. Luego, éstos se recortaron en parcelas de nubes de puntos de 1x1km de extensión. Posteriormente, se clasificaron los puntos de suelo, aspecto fundamental para el análisis y generación de modelos digitales del terreno [74].

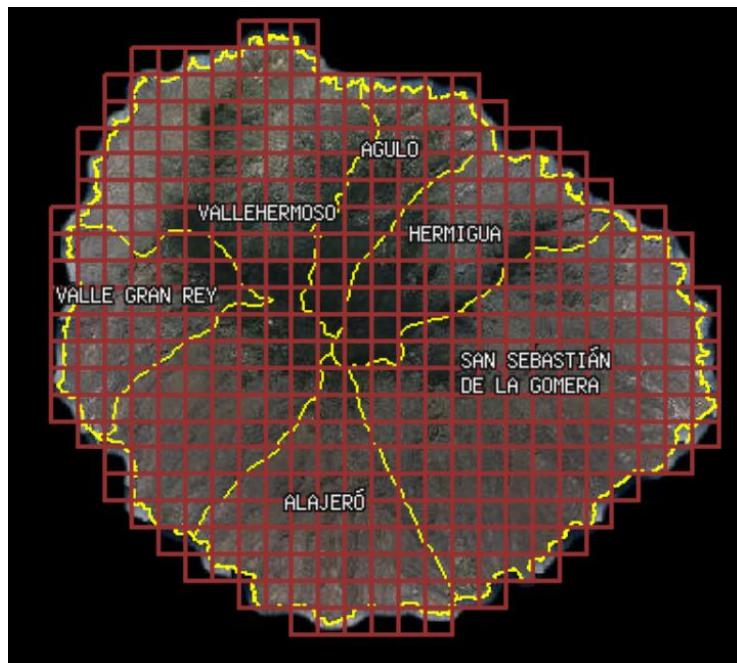


Figura 4.6. Parcelas LiDAR de GRAFCAN de la Gomera [25].

➤ Descompresión de archivos LiDAR

Esta operación se realiza a través de la herramienta *LASTask* que permite, además, visualizar la cantidad de puntos de cada archivo clasificados según el tipo de objeto al que representan. Los archivos de salida serán parcelas de nubes de puntos descomprimidas, sobre las que se puede realizar procesado y análisis, facilitando y mejorando la precisión en la compilación y cálculo de métricas a los distintos softwares.

➤ Unión de nubes de puntos

Una vez obtenidos los trozos de nubes de puntos descargados en extensión LAS, se procede a realizar un mosaico para juntar todos los trozos que corresponden a la zona de interés, dando lugar a una única nube de puntos. Para ello se emplea la herramienta *MergeData* del software FUSION. *MergeData* combina varios archivos de nubes de puntos en uno único de salida, fusionando secuencialmente cada archivo de entrada y escribiendo los datos de puntos en el archivo de salida [19].

La siguiente figura muestra la nube de puntos integrada con todas las parcelas LiDAR de GRAFCAN que contienen superficie perteneciente al PNG. la leyenda indica los valores de altimetría sobre el nivel del mar de los puntos, empleando una paleta de color verde.

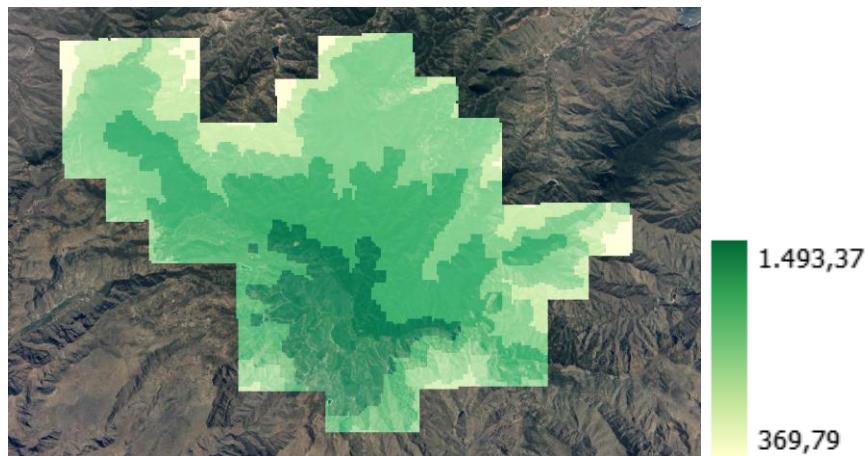


Figura 4.7. Nube de puntos integrada del total de parcelas que abarcan al PNG. En escala de verdes, según el valor de altitud sobre el nivel del mar.

➤ **Filtrado de nubes de puntos.**

Se realizó este filtrado empleando la herramienta *FilterData* de FUSION, que fue creada con el fin de ayudar a los usuarios a eliminar los valores atípicos de los archivos LiDAR entregados por los proveedores.

FilterData proporciona el filtro “/outlier” de valores atípicos, que identifica y elimina retornos basado en el rango de valores de elevación observados en la ventana de comparación. En funcionamiento, “/outlier” calcula la elevación media y el multiplicador por la desviación estándar de las elevaciones de cada celda de la cuadrícula de comparación [19]. Luego, las elevaciones de retorno individuales se comparan con el rango definido de la siguiente manera:

$$\text{Elevación Media} \pm (\text{Multiplicador} * \text{Desviación Estándar De Elevación}) \quad (4.1)$$

En la sintaxis de la aplicación, se define el filtro “/outlier” empleado, el tamaño de la ventana y el multiplicador aplicado a la desviación estándar para calcular la desviación. Mientras menor sea el valor del multiplicador, más riguroso será el filtrado. Es decir, el multiplicador indica el número de desviaciones estándar a preservar. En la Figura 4.8. se presenta la distribución normal de los datos abarcados en función de la desviación estándar. Solo incluyen en el archivo de salida los retornos que tienen altitudes dentro del rango especificado, teniendo como resultado nubes de puntos limpias para su posterior análisis.

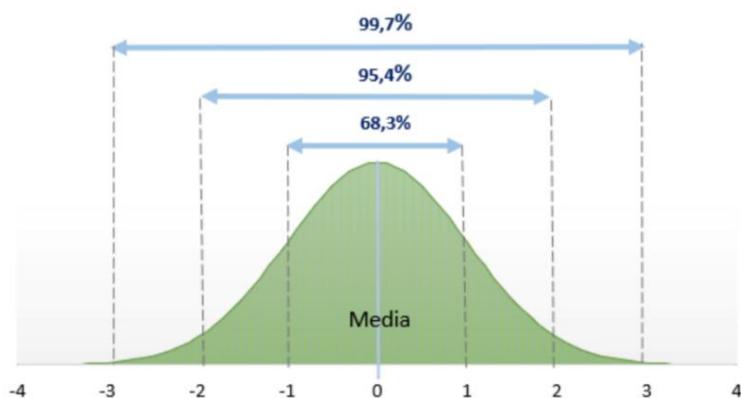


Figura 4.8. Función de desviación estándar [75].

Se opta por definir un tamaño de ventana de 100x100m, que resulta eficiente para relieves con grandes pendientes, como el caso del Garajonay, por sus pronunciados barrancos. Se realizó el filtrado con multiplicadores de desviación estándar de 3, 4, 5, 6 y 7 para seleccionar el valor más adecuado.

Los datos proporcionados por GRAFCAN ya han sido sometidos a un proceso de verificación, por lo que el porcentaje de puntos anómalos debe ser bajo. Además, la inspección visual de las nubes 3D realizadas a partir del análisis de secciones ha corroborado la buena calidad de los datos. Así, a partir del multiplicador de valor 5, el porcentaje de retorno eliminado ya es relativamente bajo.

Tabla 4.1. Resultados obtenidos según valores del multiplicador de desviación.

Multiplicador de desviación estándar	Número de retornos eliminados	% sobre el total de retornos
3	878066	0,505
4	281205	0,16
5	147413	0,084
6	85528	0,05
7	52815	0,03

Al visualizar la nube de puntos final generada tras filtrar, se eliminan algunas regiones de interés con datos correctos, incluso con un multiplicador de desviación estándar de valor 7. Posiblemente correspondan a zonas de barrancos con desniveles muy pronunciados. Esto podría encadenar una serie de errores en la generación del modelo de altura de la vegetación (CHM). En la Figura 4.9. se aprecia la pérdida de datos al filtrar la nube de puntos del PNG en la región cercana a las coordenadas 28.104253 N, 17.242693 E.

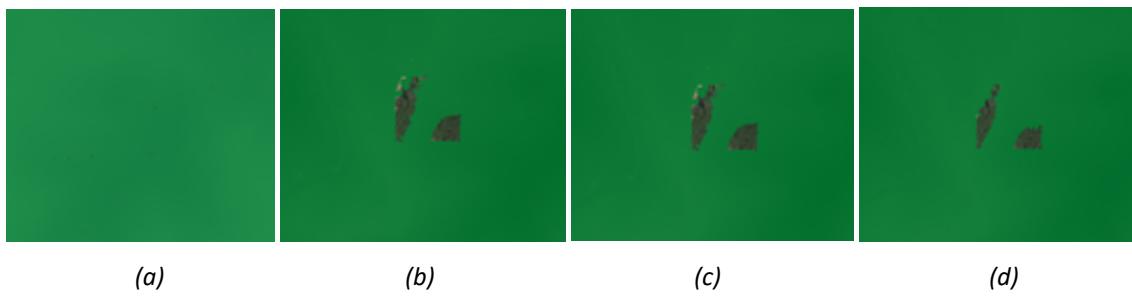


Figura 4.9. Nube de puntos ampliada de región del PNG, centrada en las coordenadas 28.104253 N, 17.242693 E. (a) Original. Filtrada con outlier para multiplicadores de desviación estándar de (b) 5, (c) 6 y (d) 7.

Finalmente, dada la compleja topografía del Garajonay, para obtener la mejor precisión posible en el análisis, se opta por no filtrar la nube de puntos, ya que se perdería densidad y datos en ciertas regiones. Se mantiene la nube de puntos proporcionada por GRAFCAN, que cuenta ya con una serie de correcciones y validaciones previas para eliminar errores sistemáticos y aleatorios, y garantizan la calidad requerida por el proyecto GRAFCAN en cuanto a densidad, distancia entre puntos, cobertura global, errores planimétricos y altimétricos, entre otras.

➤ Generación del modelo digital del terreno (MDT)

En función del proveedor de los datos LiDAR de partida, éstos pueden estar clasificados o no. En ambos casos es posible generar el MDT. En caso de estar clasificados, la clase 2 representa los puntos correspondientes al terreno (tierra o suelo).

Nuestra nube de puntos, al proceder de los vuelos LiDAR de GRAFCAN, se encuentra clasificada, lo que nos permite obtener el MDT tanto aprovechando la clasificación de suelo realizada por el proveedor como reclasificando éstos. En ambos escenarios se empleará la herramienta *GridSurfaceCreate* de FUSION, que permite crear un modelo de superficie cuadriculado utilizando colecciones de puntos aleatorios.

El modelo de superficie se almacena en formato DTM utilizando valores de elevación flotantes. Las elevaciones de las celdas individuales se calculan utilizando la elevación media de todos los puntos de la celda. Las celdas que no contienen puntos se rellenan mediante interpolación utilizando las celdas vecinas. Las elevaciones de retorno del LIDAR suelen tener errores debidos a la distancia y al error GPS-IMU. El uso de la media de todas las elevaciones de retorno en la celda reconoce este error y da como resultado una superficie que se encuentra dentro de los límites de la celda.

A continuación, se discuten ambas soluciones (con y sin datos de suelo clasificados). Para analizar la calidad de los modelos digitales creados se ha seleccionado una región ampliada, con irregularidades pronunciadas en el terreno, en la que apreciar detalladamente los resultados obtenidos.

a) Generación del MDT empleando la clasificación de suelo de GRAFCAN

Se crea el MDT con las utilidades de GridSurfaceCreate a partir de los ficheros clasificados ya por GRAFCAN (Figura 4.10). Se define para ello un tamaño de celda de 1 metro, unidades XYZ en metros, coordenadas UTM.

Se emplea el filtro (switch) de clase para suelo (clase 2) “/class:2” en GridSurfaceCreate, mediante el cual se especifica que solo deben incluirse en la submuestra los puntos con valores de clase enumerados, en este caso 2.

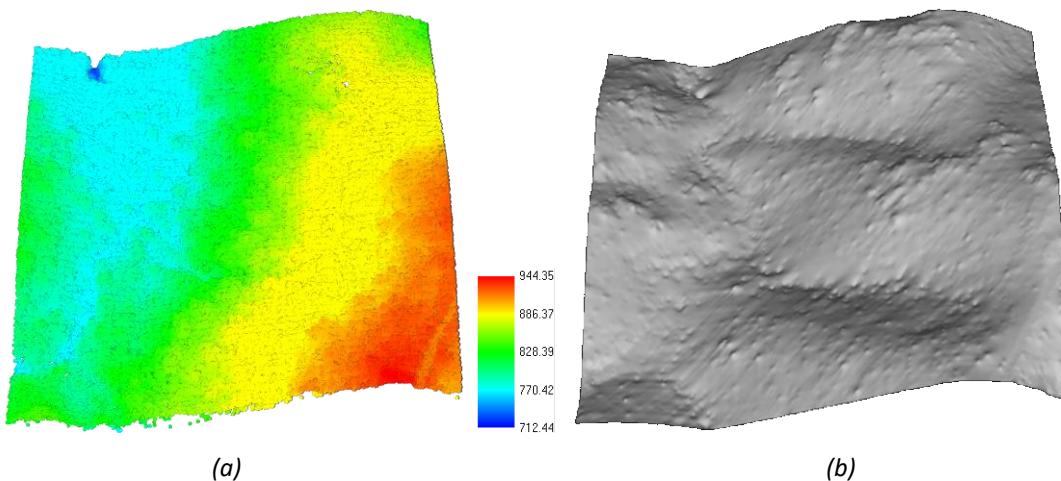


Figura 4.10. (a) Nube de puntos original representada con paleta de color arcoíris según altitud de cada punto respecto al nivel del mar. (b) MDT generado con GridSurfaceCreate empleando la clase 2.

Se identifican muchas irregularidades impropias de la superficie. Por esta razón se propone mejorar la metodología. Para ello, GridSurfaceCreate cuenta con un filtro de mediana enventanado “/median:#” que es espacialmente útil en casos como el nuestro en que los conjuntos de puntos incluyen algunos retornos residuales de la vegetación, para producir una superficie de suelo utilizable. Se prueba con ventanas de 4, 6, 8 y 10 metros [19].

En la Figura 4.11. se aprecia que no hay mejoras destacables para las distintas ventanas vecinas y tampoco en comparación con los resultados obtenidos sin emplear filtro de mediana. Se descarta emplear esta opción dado que no hay mejoras cualitativas y así evitar exponer el modelo digital final a las pérdidas de detalle que puede generar el uso del filtrado de mediana

en la superficie de zonas con rasgos muy definidos, como márgenes de carreteras, riberas de arroyos y zonas erosionadas.

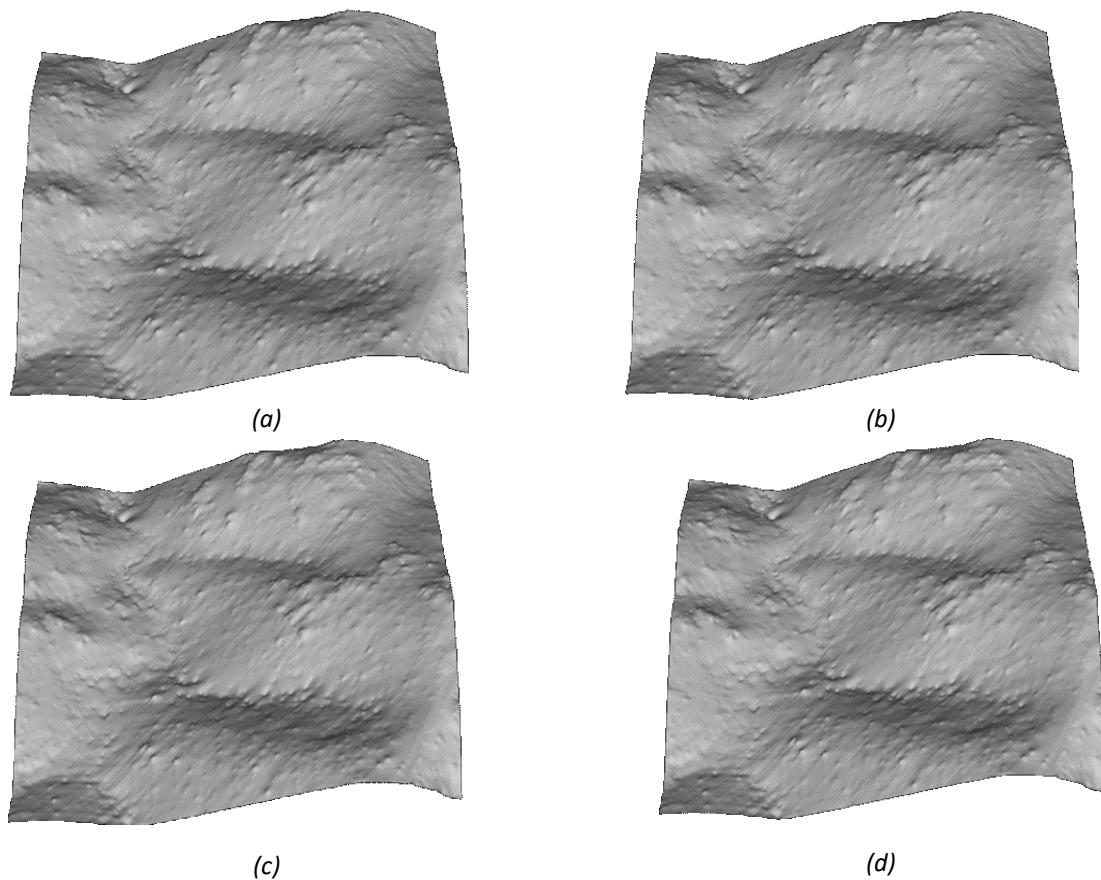


Figura 4.11. MDT generado con GridSurfaceCreate, filtro de clase 2 y filtro de mediana para ventana vecina de: (a) 4m, (b) 6m, (c) 8m y (d) 10.

Otra alternativa analizada para evitar irregularidades del terreno es el filtro de picos “/spikes:#” de GridSurfaceCreate, que permite eliminar los picos con pendientes superiores al “#” por ciento de la superficie final. Este filtrado se realiza después de todos los demás suavizados y filtrados. En zonas de topografía moderada, es útil para eliminar picos relacionados con retornos residuales de la vegetación. En zonas con topografía escarpada, el filtrado de picos puede dar lugar a un suavizado excesivo de las características del terreno; especialmente aquellas características que definen las transiciones de zonas de baja pendiente a zonas de alta pendiente [19].

Se analizaron los resultados obtenidos empleando valores de pendientes del 20%, 30%, y 50%. En la Figura 4.12. se muestran los resultados obtenidos al aplicar este método. Con este filtrado sí que se aprecian mejoras respecto al modelo generado inicialmente. Sin embargo, para diferentes valores de porcentajes, los resultados son prácticamente similares. Se decide escoger un valor de 50% para afectar lo menos posible a la nube de puntos de partida.

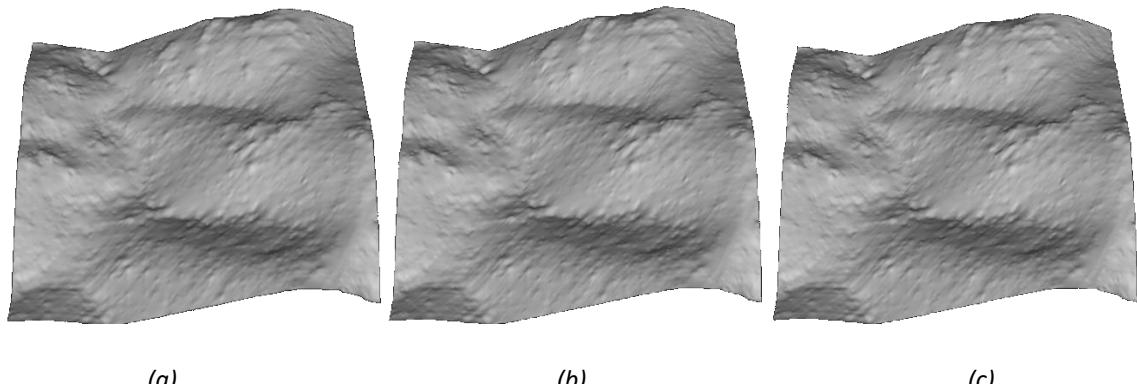


Figura 4.12. MDT generado con *GridSurfaceCreate* con filtro clase 2 y filtro de picos para valores de: (a) 30%, (b) 40% y (c) 50%.

En la Figura 4.13. se aprecia una comparación del MDT inicial y filtrado. Se resuelven irregularidades de forma considerable, aunque cabe destacar que, dada la poca densidad de la nube de puntos LiDAR, no se logran eliminar totalmente.

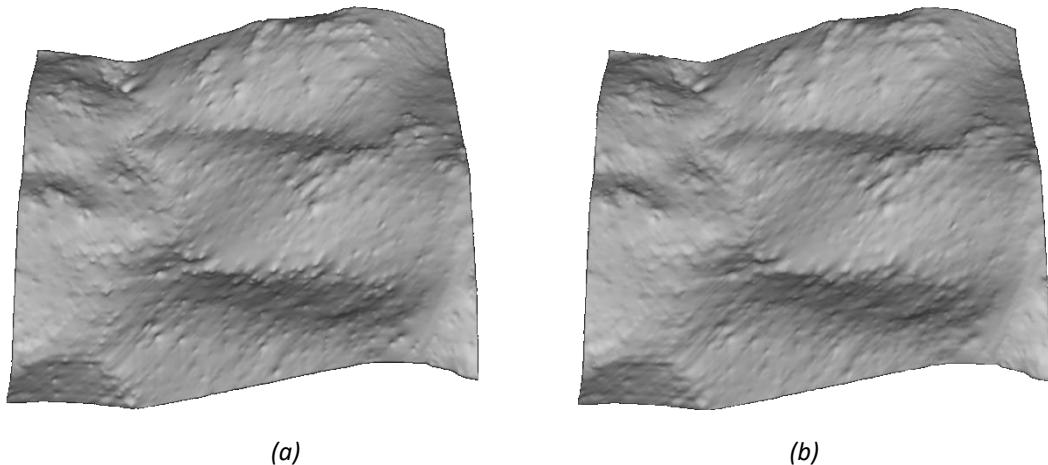


Figura 4.13. (a) MDT generado con *GridSurfaceCreate* y filtro de clase 2. (b) MDT generado con *GridSurfaceCreate* y filtro de clase 2 más el filtro de picos para 50% de pendiente.

b) Generación del MDT sin los puntos de suelo (clase 2) clasificados

La primera etapa de este proceso pasa por identificar los puntos de suelo a partir de la nube de puntos original. *GroundFilter*, de FUSION, identifica aquellos datos que se encuentran en la superficie probable del terreno (puntos de tierra desnuda). *GroundFilter* no produce un conjunto perfecto de retornos de tierra desnuda, ya que no elimina completamente los retornos de superficies grandes, relativamente planas y elevadas, como los tejados de los edificios. La mayor parte de la vegetación se elimina con los coeficientes adecuados para la función de ponderación y suficientes iteraciones [19].

El algoritmo de *GroundFilter* se basa en la predicción lineal con una precisión individual para cada medición. Se aplica como un proceso iterativo. En el primer paso, se calcula una superficie con pesos iguales para todos los puntos LiDAR. El resultado es una superficie que se sitúa entre el terreno verdadero y la superficie del dosel (retornos más elevados). Es más probable que los puntos de terreno estén por debajo de la superficie y los puntos de vegetación por encima. La distancia y la dirección a la superficie se utilizan para calcular las ponderaciones de cada punto LiDAR mediante la función de ponderación que se muestra a continuación, donde los parámetros a y b determinan la inclinación de la función de ponderación. El valor de desplazamiento, g , determina a qué puntos se les asigna un peso de 1 (el valor de peso máximo). El parámetro de desplazamiento por encima del nivel del suelo, w , se utiliza para establecer un límite superior para que los puntos influyan en la superficie intermedia. A los puntos situados por encima del nivel definido por $(g + w)$ se les asigna un peso de 0. Después de la iteración final, se seleccionan los puntos de tierra desnuda utilizando la superficie intermedia final. Todos los puntos con elevaciones que satisfacen las dos primeras condiciones de la función de peso se consideran puntos de tierra desnuda. La ecuación 4.1 describe este algoritmo iterativo [19]:

$$p_i = f(x) = \begin{cases} 1 & , v_i \leq g \\ \frac{1}{1+(a(v_i-g)^b)}, & g < v_i \leq g + w \\ 0 & , g + w < v_i \end{cases} \quad (4.2)$$

La definición de los parámetros g y w , según la superficie que se desea analizar, dará lugar a resultados más precisos. Para ello, se lleva a cabo con valores mostrados en la Tabla 4.2. Tomando como archivo de entrada la nube de puntos habitual para la generación del MDT, se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 4.2.

*Tabla 4.2. resultados obtenidos según valores de g y w de *GroundFilter*.*

g	w	Puntos clasificados como Terreno	Puntos no clasificados como Terreno	% de puntos no clasificados como terreno sobre los clasificados como terreno
-1	3	21395373	42034457	196,47
-2	3	21344804	33467027	156,8
-3	3	8135610	1394561	17,14
-1	2,5	21381644	38662355	180,8
-2	2,5	21137115	23701872	112
-3	2,5	1909084	1056688	55,35
-1	2	21345236	33531519	157,1
-2	2	8118062	1389374	17,11
-3	2	470044	346530	73,72
-2,5	2	1912590	1060394	55,44
-2,5	2,5	8128415	13911987	171,15
-2,5	3	21149042	23797669	112,5

Tras un análisis visual, los mejores resultados se obtienen empleando valores de $g = -2$ y $w = 2$, y $g = -3$ y $w = 3$, donde los puntos que no representan datos del terreno significan una proporción despreciable respecto a los clasificados como suelo, no apreciándose diferencias significativas entre éstos. Se decide a elegir $g = -2$ y $w = 2$.

En la Figura 4.14 se aprecia el MDT generado con puntos solo de suelo aplicando esta metodología, sin ningún filtrado adicional. Se aprecian bastantes irregularidades en la superficie, motivo por el cual se procede a experimentar con varias utilidades de la herramienta para mejorar los resultados. Empleando *FilterData* con switch “outlier” para eliminar valores atípicos de la nube de puntos, con valores de multiplicador de desviación estándar de 5 y 7 para luego volver a generar el MDT con *GridSurfaceCreate* se obtienen los resultados de la Figura 4.14. No se obtienen mejoras apreciables, por lo que se descarta esta variante.

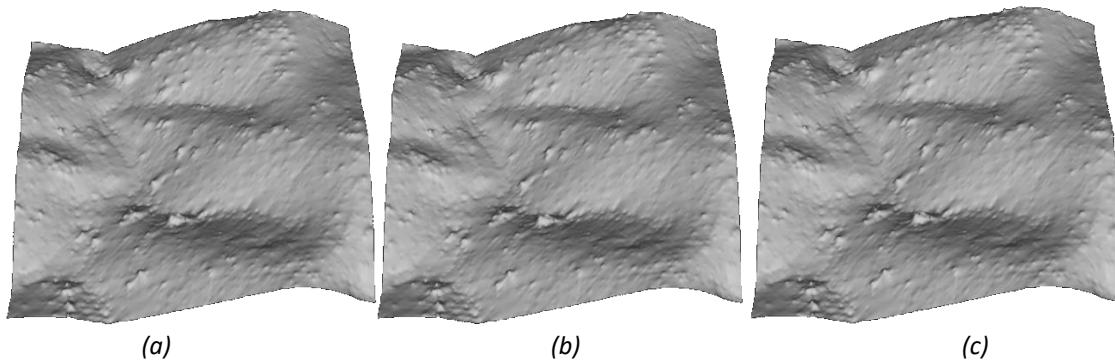


Figura 4.14. MDTs generados con $g = -2$ y $w = 2$: (a) sin filtrado adicional, con *FilterData* para outlier: (b) 5 y (c) 7.

Se propone ahora crear el MDT empleando el filtro de picos de *GridSurfaceCreate*, para un 50% de pendiente. Como se aprecia en la figura 4.15, se mejora la calidad del MDT generado inicialmente.

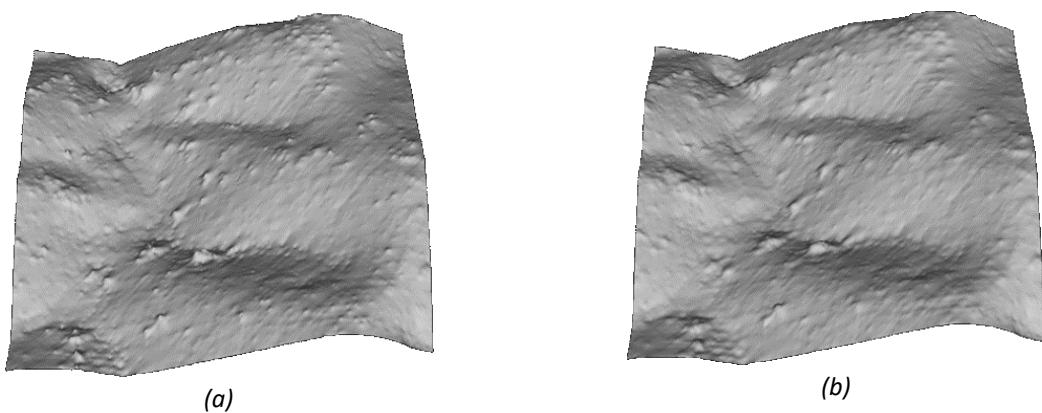


Figura 4.15. (a) MDT generado sin emplear filtros. (b) MDT generado empleando filtro de picos para valor 50%.

Finalmente, tras la etapa de análisis previa realizada, en la Figura 4.16 se presenta la comparación visual de los resultados obtenidos empleando ambas tecnologías. De una parte, la clasificación de puntos de tierra brindada por GRAFCAN (clase 2) y, de otra, mediante el algoritmo iterativo de clasificación de suelo con $g = 2$ y $w = -2$:

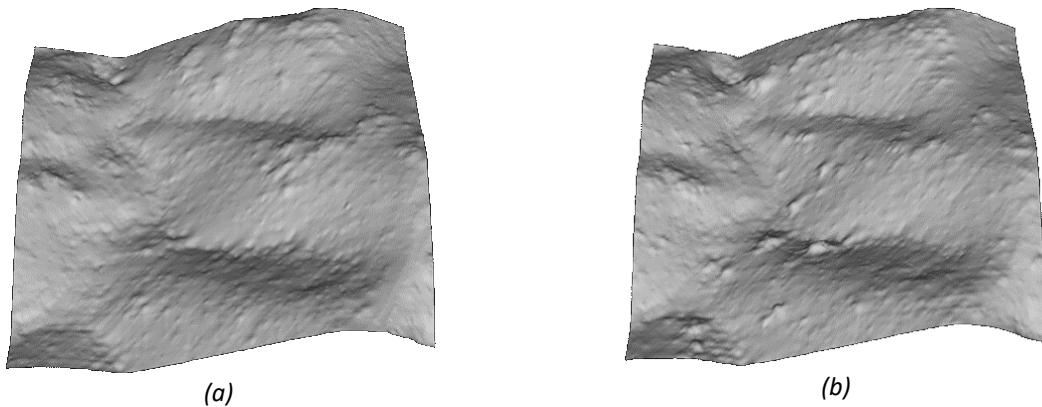


Figura 4.16. (a) MDT generado empleando la clase 2 de GRAFCAN y filtro de picos con valor 50%. (b) MDT generado estimando los puntos de suelo y empleando el filtro de picos con valor 50%.

Se observa que la generación del modelo digital del terreno con los puntos de suelo clasificados por GRAFCAN genera resultados mejores, presentando menos irregularidades. Esto se traduce en que se obtendrán resultados de mayor precisión. En definitiva, la metodología final propuesta se basa en generar el MDT mediante *GridSurfaceCreate* de FUSION, aplicando el filtro de clase 2 y el de picos con valor de 50%.

El MDT generado están en formato ráster DTM, que se puede emplear únicamente en el software FUSION. Con el objetivo de emplear dicho modelo digital para análisis y visualización en otros softwares se convierte a formato ASCII con la función *ASCII2DTM* de FUSION, resultando en un archivo ráster ASCII, de extensión .asc.

Hasta este punto, se ha obtenido el MDT correspondiente a la totalidad de parcelas LiDAR que contienen alguna porción de superficie del PNG. El objetivo final es analizar únicamente la superficie correspondiente al PNG. Para lograrlo, se debe enmascarar la imagen para que contenga información solamente de la extensión geográfica del Garajonay.

El enmascaramiento se realiza manualmente a partir de la herramienta de extracción directa de datos ráster del propio QGIS. Para ello, se utiliza el archivo de contorno (*shape*) que contiene información sobre los límites del PN de Garajonay a partir del cual se extrae la información del MDT contenida dentro se dicho contorno para dar lugar a un mapa del MDT del Parque.

En la Figura 4.17. se muestra el MDT enmascarado resultante de todo el Parque Nacional de Garajonay. La representación se ha generado en QGIS basado y se ha aplicado un modelo de sombras y un mapa coloreado en función de la altura sobre el nivel del mar, y se ha superpuesto sobre la vista satelital de Google de la región ocupada por el Parque en la Gomera.

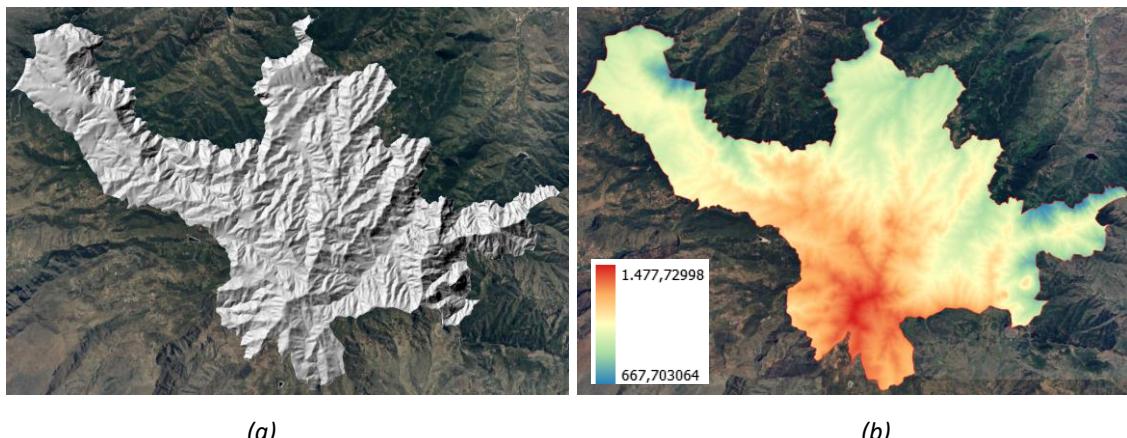


Figura 4.17. Modelo ráster del MDT, representado en: (a) en modelo de sombras, (b) paleta de colores arcoíris invertida en función de la altura respecto al nivel del mar.

➤ Generación del modelo digital de superficie (MDS)

La función *CanopyModel*, de FUSION, crea modelos de superficie del dosel utilizando una nube de puntos LIDAR. Por defecto, el algoritmo utilizado por *CanopyModel* asigna al centro de la celda de la cuadrícula la elevación del retorno más alto dentro de cada celda de la cuadrícula. Por defecto, *CanopyModel* rellena "huecos" en la superficie donde no había puntos. Para ello, utiliza una búsqueda en ocho direcciones para encontrar valores válidos en la superficie y, a continuación, utiliza una media ponderada por distancia para calcular los valores de los "huecos".

Para generar el modelo de superficie (MDS) se define *CanopyModel* para una cuadrícula de 1x1m, se aplica filtro de picos (/peaks) para fijar los picos a la superficie y mantener su valor. Se definen también los parámetros de las unidades XYZ en metros y se selecciona como proyección en coordenadas UTM. El resultado es un modelo digital en formato DTM que representa la altitud de la vegetación, es decir, la altura respecto al nivel del mar del primer retorno de cada pulso.

A modo de representar la diferencia entre los modelos generados, en la Figura 4.18 puede apreciarse el MDS y MDT de una sección ampliada del Garajonay, y ambos (MDS y MDT) superpuestos. La representación se realizó por medio de la herramienta LDV de FUSION. En la

Imagen se aprecia como el MDS es mucho más irregular al representar la altura máxima de cada punto que, siendo el caso del Garajonay, corresponde al arbolado.

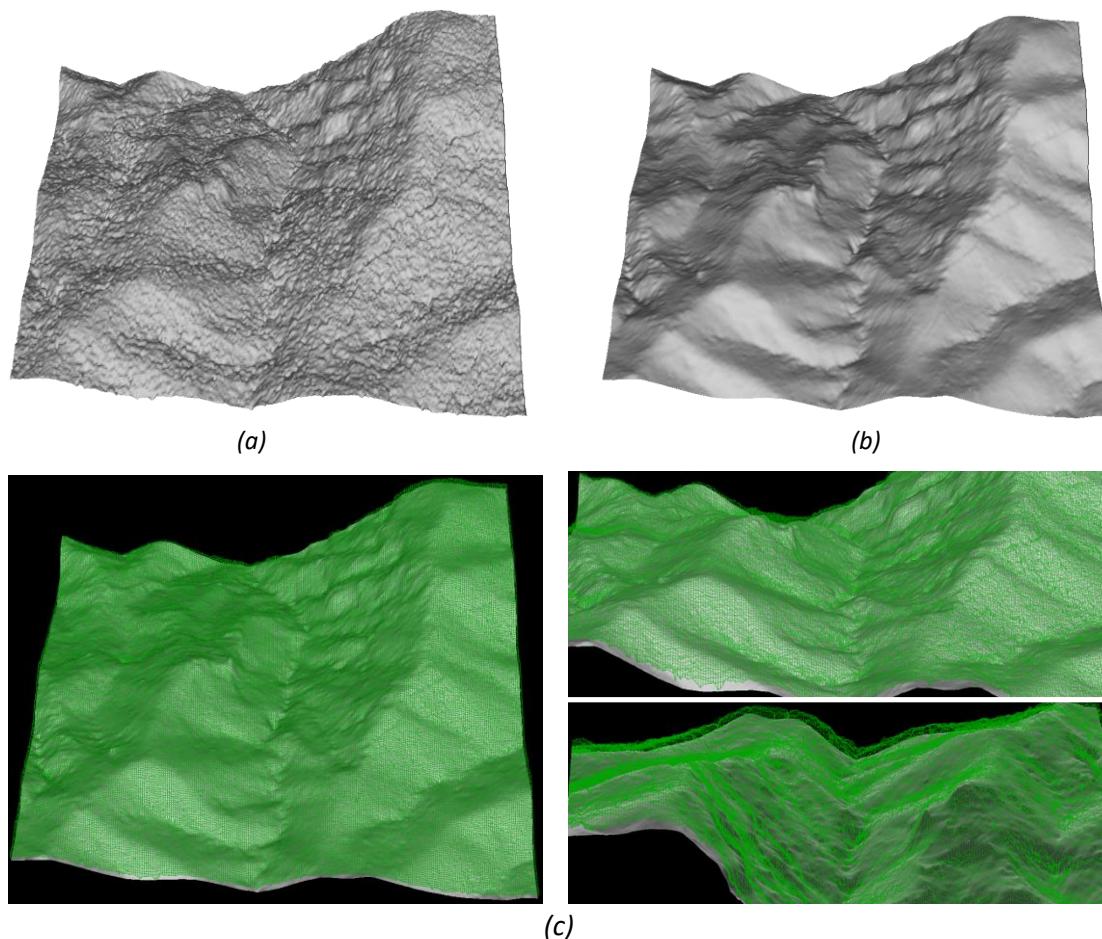


Figura 4.18. Sección ampliada de: (a) MDS final, (b) MDT final y (c) MDS superpuesto, representado por malla verde, por sobre MDT, representado en gris continuo, desde diferentes perspectivas.

➤ Generación del modelo digital del dosel (CHM)

Para generar el modelo de superficie normalizado, también conocido como modelo digital del dosel (CHM) en análisis forestal, se hace uso de la misma función (*CanopyModel*), con los mismos parámetros, pero además se emplea el filtro de tierra (/ground) tomando como archivo de entrada el MDT generado en la etapa anterior. Cuando se utiliza comutador “/ground” con un modelo de suelo desnudo, la elevación del suelo interpolada a partir del modelo de superficie de tierra desnuda (MDT) se sustrae de la elevación de retorno (MDS) antes de determinar el valor de retorno más alto para producir un modelo de altura del dosel (CHM). El resultado es un modelo digital que representa la altura real de la vegetación

En la Figura 4.19 se muestra la misma sección ampliada que se empleó anteriormente para representar el MDS y MDT obtenidos, en este caso, para el CHM. En la imagen se aprecia como

Capítulo 4. Análisis del estado de salud vegetal en el Parque Nacional de Garajonay

el modelo obtenido tiene ya una distribución normal y no se encuentra influenciado por el relieve de la superficie, representando la altura real del arbolado.

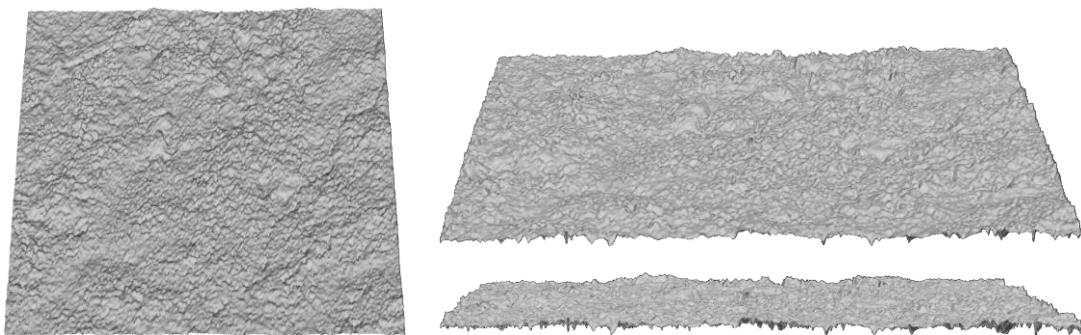


Figura 4.19. Sección ampliada del CHM final desde diferentes perspectivas.

Los archivos generados están en formato DTM, que solo es utilizable en el software FUSION. Con intención de emplear estos modelos digitales para análisis y visualización en otros softwares se convierten, nuevamente, a formato ASCII con la función *ASCII2DTM* de FUSION, resultando en archivos ráster ASCII.

Con el mismo propósito que cuando se generó el MDT, se enmascara el CHM empleando las herramientas de QGIS, dando lugar a un mapa del dosel del PNG. En la Figura 4.20 se muestra una representación del CHM final del PNG, representado en QGIS empleando una paleta de colores arcoíris invertida según la altura y superponiéndolo sobre la vista satelital.

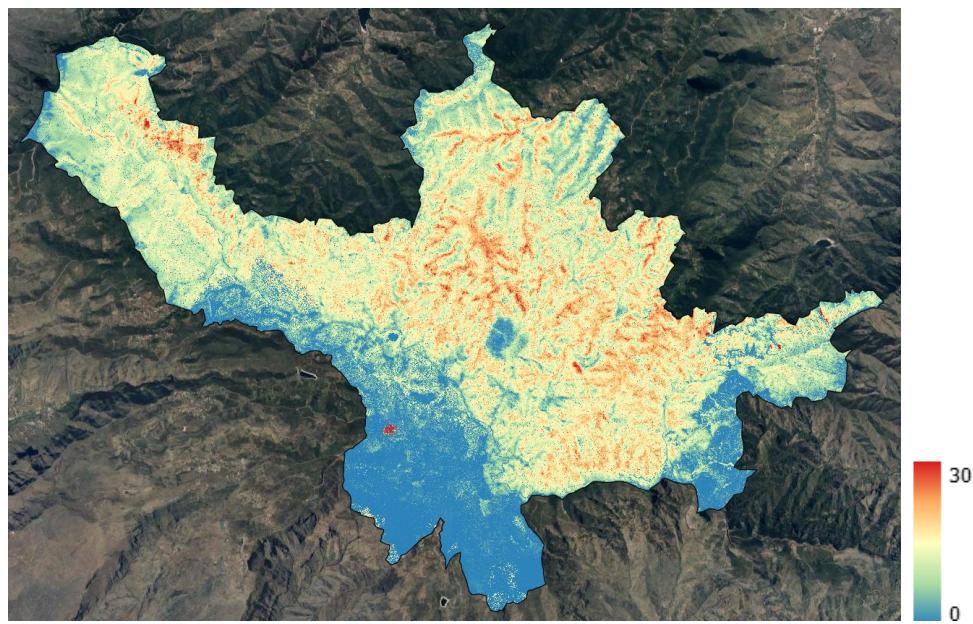


Figura 4.20. Modelo ráster del CHM del Parque Nacional de Garajonay.

4.3.2. Validación de los datos de elevación del dosel arbóreo

Teniendo en cuenta la importancia de la precisión del análisis que se prevé realizar, resulta trascendental llevar a cabo un proceso de validación de los resultados a partir de los datos recolectados en campo para verificar y confirmar la validez de la información obtenida a partir de los datos LiDAR.

Como se indicó en el apartado 4.2, se cuenta con información de parcelas detalladas y parcelas globales. Para corroborar la información de altimetría obtenida con el modelo digital de dosel (CHM) generado resultan útiles las parcelas de nivel más detallado. Los datos LiDAR fueron tomados en vuelos realizados en el año 2017. Por este motivo, de las parcelas detalladas disponibles muestreadas durante el año 2017, se ha seleccionado la de Lamaqué.

Se toma la parcela Lamaqué para validar los resultados obtenidos en la generación del CHM. Dicha parcela está centrada en las coordenadas UTM X = 280757, Y = 3114858, con una extensión rectangular de 60x40 m, para una superficie total de 2400 m². Para todos los árboles existentes en la parcela se tienen datos de altura total, altura de base de copa, diámetro, número de chupones (diferenciados por encima y por debajo de los 3 cm), altura máxima a chupón y vigor, de todas las especies vegetales del estrato dominante que conforman la estructura vertical del bosque.

Se contabilizaron una totalidad de 477 árboles dentro de la parcela, a partir de los cuales se han estimado los estadísticos indicados en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Estadísticas de muestreo en campo de la totalidad arbórea de la parcela Lamaqué.

	TOTALIDAD DE ÁRBOLES DE LAMAQUÉ							
	ALTURA		DIÁMETRO NORMAL		Nº CHUPONES		ALTURA MÁXIMA CHUPON	VIGOR
	TOTAL	BASE DE COPA	I	II	> 3 cm	< 3 cm		
VALOR MÁXIMO	21,00	14,80	58,20	58,90	11,00	51,00	14,20	3,00
VALOR MÍNIMO	1,50	1,49	6,50	6,50	1,00	1,00	0,14	0,00
VALOR MEDIO	12,20	6,73	14,57	14,52	1,65	5,32	5,57	2,16
VALOR MODAL	12,20	6,50	8,20	7,40	1,00	1,00	8,00	3,00
DESVIACIÓN ESTANDAR	3,38	2,40	9,08	9,10	1,40	8,21	3,42	1,29

Capítulo 4. Análisis del estado de salud vegetal en el Parque Nacional de Garajonay

Dentro de la totalidad de árboles muestreados, resulta interesante también analizar solo aquellos que se encuentran en buen estado vitalicio, por sus características. Dichos árboles son aquellos que tienen un valor de vigor mayor a 0 (el valor 0 indica árboles muertos). En total, existen 340 árboles en estado saludable, a partir de los que se pueden obtener las métricas mostradas en la Tabla 4.4. Este análisis se hace para validar los datos LiDAR, por eso, dado que resolución media que es de 1.2 ptos/m², los árboles desvitalizados que no tienen hojas ni una copa frondosa pueden alterar el resultado de la validación.

Tabla 4.4. Estadísticas de muestreo en campo de árboles saludables de la parcela Lamaqué.

	ÁRBOLES SALUDABLES DE LAMAQUÉ							
	TOTAL	BASE DE COPA	DIÁMETRO NORMAL		Nº CHUPONES		ALTURA MÁXIMA CHUPON	VIGOR
VALOR MÁXIMO	21,00	14,80	I 47,10	II 52,30	> 3 cm 2,50	< 3 cm 11,00	51,00	14,20
VALOR MÍNIMO	2,93	1,49	I 6,70	II 6,50	> 3 cm 2,22	< 3 cm 1,00	1,00	0,14
VALOR MEDIO	12,80	6,73	I 13,54	II 13,53	> 3 cm 2,36	< 3 cm 1,65	5,32	5,57
VALOR MODAL	12,20	6,50	I 9,00	II 7,40	> 3 cm 1,00	< 3 cm 1,00	1,00	8,00
DESVIACIÓN ESTANDAR	2,83	2,40	I 6,473	II 6,61	> 3 cm 0,2	< 3 cm 1,39	8,20	3,42

El proceso de validación consiste en generar estadísticas de un recorte del área de la nube de puntos total del PNG que abarque únicamente la superficie de la parcela Lamaqué. Se compararán los resultados de altimetría LiDAR obtenidos con respecto a los muestreados en campo en el mismo año.

El recorte de la nube 3D se realiza a través de la función *ClipData* que proporciona FUSION. *ClipData* crea submuestras de datos LIDAR para diversas tareas de análisis. La zona recortada puede ser redonda o rectangular y puede ser grande o pequeña. Se genera el recorte con *ClipData* definiendo su punto inicial y final, teniendo en cuenta que es rectangular. El punto inicial representa la esquina inferior izquierda de la submuestra que se desea generar, y el punto final la esquina superior derecha, obtenidos a partir de los datos iniciales de la parcela Lamaqué (Figura 4.21).

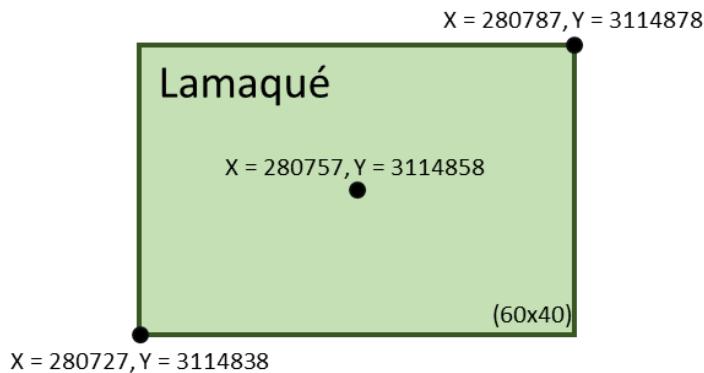


Figura 4.21. Coordenadas de parcela Lamaqué.

Es necesario el empleo de los comutadores “/shape”, “/dtm”, “/height” y “/zmin” de ClipData. La salida es una nube de puntos del dosel de la superficie que representa la parcela Lamaqué. A continuación, se describen los filtros empleados:

- “/shape:0” define una zona de muestreo de forma rectangular.
 - “/dtm” para usar el modelo de superficie de tierra desnuda obtenido anteriormente para normalizar los datos LiDAR (resta la elevación de la superficie de tierra desnuda de la elevación de cada punto LiDAR).
 - “/height” convierte las elevaciones de los puntos en alturas sobre el terreno utilizando el archivo MDT especificado con el parámetro. Solamente es válido si se utiliza /dtm.
 - “/zmin:0” incluye sólo puntos con elevación mayor que 0, al incluir /dtm y /height solo serán validos los retornos por encima del nivel del suelo, es decir, vegetación y objetos.

En la figura 4.22 se muestra una representación gráfica del recorte realizado a la nube de puntos, correspondiente a la superficie de la parcela Lamaqué. La representación de la nube de puntos se realiza por medio de la herramienta LDV de FUSION, en escala de arcoíris invertida según el valor de altura sobre la superficie del terreno de cada punto, desde distintas perspectivas.

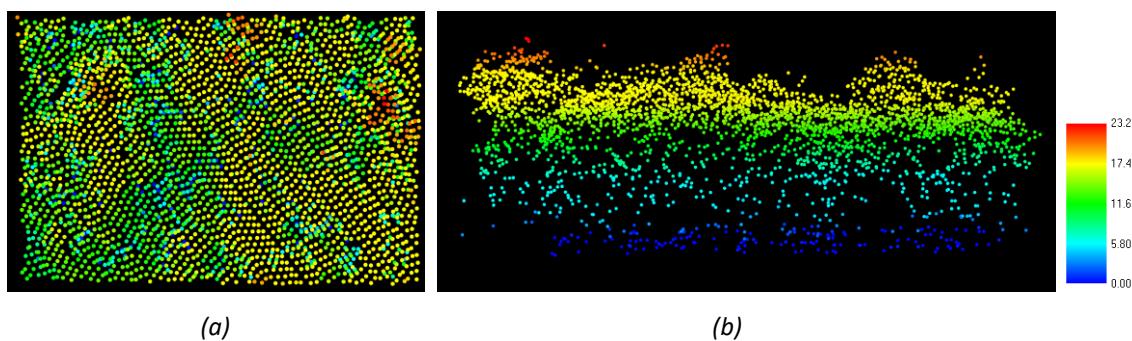


Figura 4.22. Nube de puntos LiDAR de parcela Lamaqué desde: (a) vista aérea, (b) vista frontal.

Adicionalmente, en la Figura 4.23, se representa la nube de puntos Lamaqué a través del software QGIS, en escala de arcoíris invertida según el valor de altitud de cada punto,

Capítulo 4. Análisis del estado de salud vegetal en el Parque Nacional de Garajonay

superponiéndola sobre vista satelital, para visualizar que porción representa respecto al Garajonay.

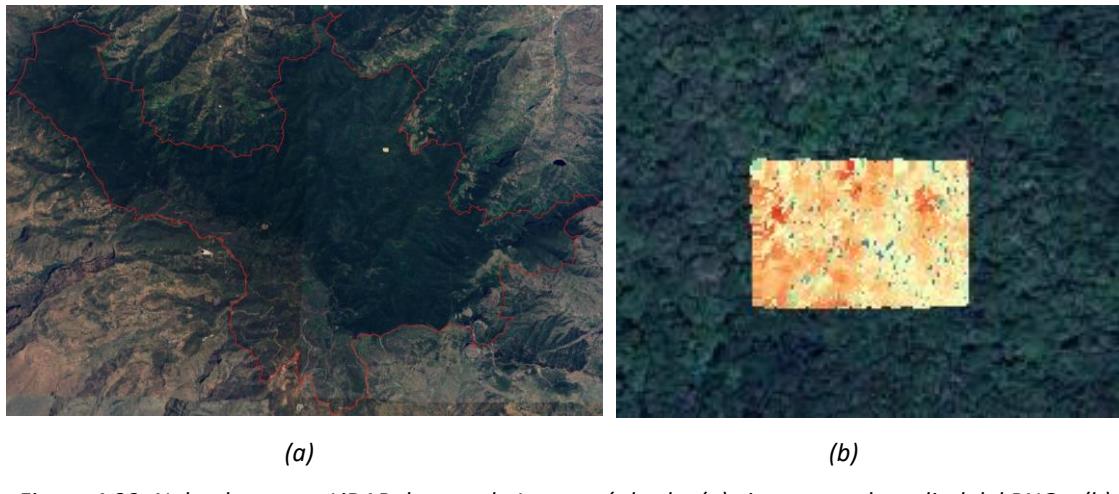


Figura 4.23. Nube de puntos LiDAR de parcela Lamaqué desde: (a) vista general satelital del PNG y (b) vista satelital detallada de la zona donde se ubica.

Luego, a partir de la nube 3D obtenida, se generan sus estadísticas a través de la función *CloudMetrics* de FUSION, que calcula las métricas a partir elevaciones de puntos y valores de intensidad. En dicha función, se emplean los comutadores “/new”, “/id”, “/outlier” y “/above”, descritos a continuación:

- “/new” fuerza la creación de un nuevo archivo de datos.
 - “/id” analiza el nombre del archivo de datos para crear un identificador para el registro de salida, si éste no incluye un número se le asignará al archivo el identificador predeterminado de 0, que se podrá visualizar en el primer campo de la primera columna del archivo de salida, antes del nombre del archivo de entrada.
 - “/outlier:bajo,alto” omite los puntos con elevaciones por debajo del valor de bajo y por encima del de alto, en metros. Como los datos de entrada fueron normalizados en etapas anteriores, bajo y alto se interpretan como alturas sobre el terreno. Se emplea outlier con la finalidad de definir el rango de alturas de las que se quiere generar las estadísticas, en este caso, los árboles en estado vital. A partir de los valores de campos se define 1.50 m como altura más baja y 30 m como la más alta. Se aplica /outlier:1.5,30.
 - “/above:#” calcula varias estimaciones de cobertura utilizando el límite de altura especificado (#). Genera estadísticas adicionales para el ratio de retornos por encima de la altura especificada. Se define para 1.5 m (/above:#) por ser el valor de elevación mínima de Lamaqué. Estas estadísticas serán las que se empleen en el análisis.

Capítulo 4. Análisis del estado de salud vegetal en el Parque Nacional de Garajonay

Los resultados se escriben en un archivo de valores separados por comas, en formato CSV que pueden leerse fácilmente con programas de bases de datos, estadísticas y MS-Excel. En la Tabla 4.5. Se muestra una comparación de los resultados de altura obtenidos a partir de los datos LiDAR respecto a los datos de campo.

Tabla 4.5. Comparación de resultados de altura del arbolado.

VALIDACIÓN DE RESULTADOS LIDAR (PARCELA LAMAQUÉ)					
ALTURA TOTAL (m)	DATOS LIDAR	DATOS DE CAMPO		RESULTADOS	
	NUBE DE PUNTOS	TOTAL DE ÁRBOLES	ÁRBOLES SALUDABLES	ERROR RESPECTO AL TOTAL DE ÁRBOLES	ERROR RESPECTO A LOS ÁRBOLES SALUDABLES
VALOR MÁXIMO	23,21	21,00	21,00	2,21	2,21
VALOR MÍNIMO	1,56	2,93	1,50	1,37	0,06
VALOR MEDIO	13,8	12,80	12,20	1	1,6
VALOR MODAL	14,61	12,20	12,20	2,41	2,41
DESVIACIÓN ESTANDAR	3,9	2,83	3,38	1,07	0,52

Al comparar los valores resultantes se aprecian ciertas diferencias. Se obtuvo un error de la altura de los árboles entre 1 y 2 metros aproximadamente. Es necesario tener en cuenta que los datos fueron tomados en el mismo año 2017 pero en distintas fechas. Además, la frondosidad y similitud de las especies del PNG dificulta la toma de datos de campo, pues en la mayor parte de su superficie no es posible apreciar correctamente la copa de los árboles, lo que conlleva a que se realicen ciertas aproximaciones que pueden alejar los datos de la realidad, constituyendo como la principal fuente de error. El vuelo LiDAR, por su parte, sí permite obtener con precisión el valor de altura respecto a la copa de los árboles.

Teniendo en cuenta dichas circunstancias, con un error relativo medio de 1.32 m respecto la totalidad del arbolado de la parcela Lamaqué se puede afirmar que los métodos y modelos empleados para obtener los resultados a partir de datos LiDAR garantizan la precisión y confiabilidad deseadas.

4.3.3. Análisis de estado de salud de la vegetación

En ciertas zonas del Parque Nacional de Garajonay se han detectado fenómenos de desvitalización. A causa de la pérdida de vigorosidad vegetal en determinadas regiones el análisis

Capítulo 4. Análisis del estado de salud vegetal en el Parque Nacional de Garajonay

del estado de salud de la vegetación toma un papel fundamental como parte del plan de recuperación y prevención del PNG.

En este sentido, la altura se muestra como índice indirecto del bienestar del arbolado y puede ser un indicador de su vigor y crecimiento. En general, el arbolado saludable tiende a tener un crecimiento vertical adecuado y una altura proporcional a su etapa de desarrollo.

El estudio realizado consiste en el análisis y detección de zonas desvitalizadas a partir de los modelos digitales del dosel generados a partir de datos LiDAR. Para ello, es necesario estimar las elevaciones medias y predominantes de las especies más representativas del PNG.

Las parcelas de campo monitorizadas a nivel global se encuentran distribuidas por todo el Garajonay de forma uniforme (Figura 4.3). Por esta razón, se decide emplearlas como datos de referencia que caractericen a todo el parque.

Por la importancia etnográfica de las formaciones de laurisilva, además de ser predominante, se procede a analizar posibles zonas de desvitalización de dicha especie. Las estadísticas de distintos tipos de laurisilvas extraídas a partir de la información de las parcelas de nivel global se presentan en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6. Estadísticos de campo de parcelas globales.

ESPECIES DE LAURISILVAS IDENTIFICADAS					
ESPECIES	Nº DE EJEMPLARES	ALTURA MÁXIMA	ALTURA MÍNIMA	ALTURA MEDIA	DESVIACIÓN
ILEX CANARIENSIS	557	27	4,4	12,95	4,26
LAURUS NOVOCANARIENSIS	637	32,6	1,34	15,92	5,07
MORELLA FAYA	552	32,9	1,80	14,39	6,02
PERSEA INDICA	83	32,90	2,80	21,98	6,65
PICCONIA EXCELSA	52	21,90	6,40	12,29	3,13

Como se aprecia en la tabla, sobre algunas especies no se tienen datos suficientes como para tenerlas en consideración desde el punto de vista estadístico. En consecuencia, no se han incluido los datos de las especies de laurisilva *Apollonia barbujana*, *Gymnosporia cassinoides* y *Ocotea foetens*. Tomando esto en consideración se generó una gráfica de distribución total de especies de laurisilvas según rangos de altura (Figura 4.24).

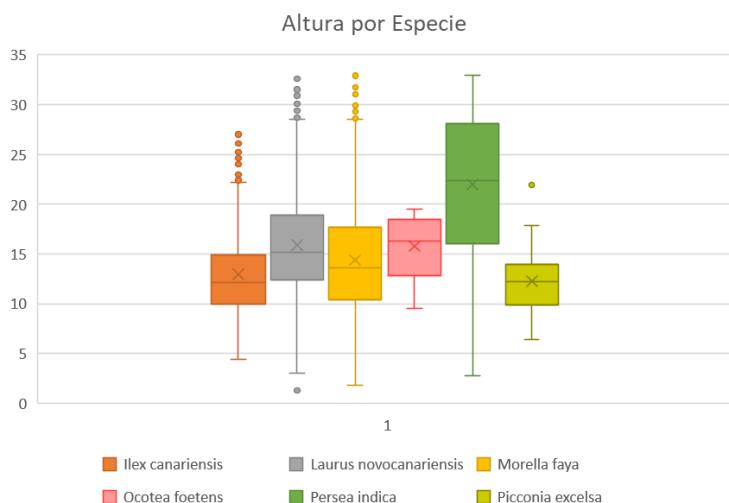


Figura 4.24. Distribución de especies de laurisilva según altura.

Como se aprecia en el diagrama de cajas de la Figura 4.24, se considerarán frondosas (buen estado vegetal) zonas donde las formaciones de laurisilva tengan valores por encima de los 10 metros. Sin embargo, al ser un bosque maduro, valores por debajo de 10 metros se pueden corresponder a zonas con problemas de desvitalización, diferenciándose del suelo o vegetación baja los que estén por debajo de 2 metros. La Figura 4.25 muestra el mapeo del dosel del Garajonay, según nuevos límites de altura, en ella se han recuadrado diferentes zonas de posible desvitalización.

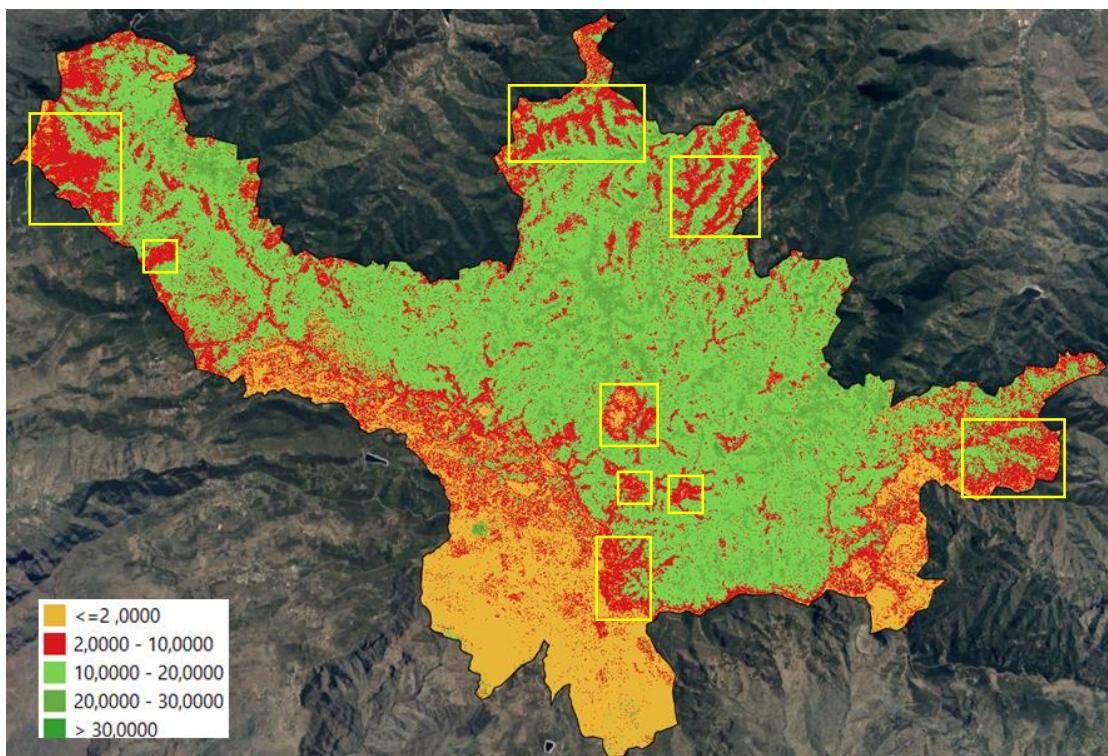


Figura 4.25. Mapeo del dosel escalado según altura.

Capítulo 4. Análisis del estado de salud vegetal en el Parque Nacional de Garajonay

En la Figura 4.26, gracias al MDT, se puede ver como zonas donde se detectó desvitalización anteriormente (zonas rojas) coinciden con zonas de relieve más elevado, como parte alta de montañas y laderas.

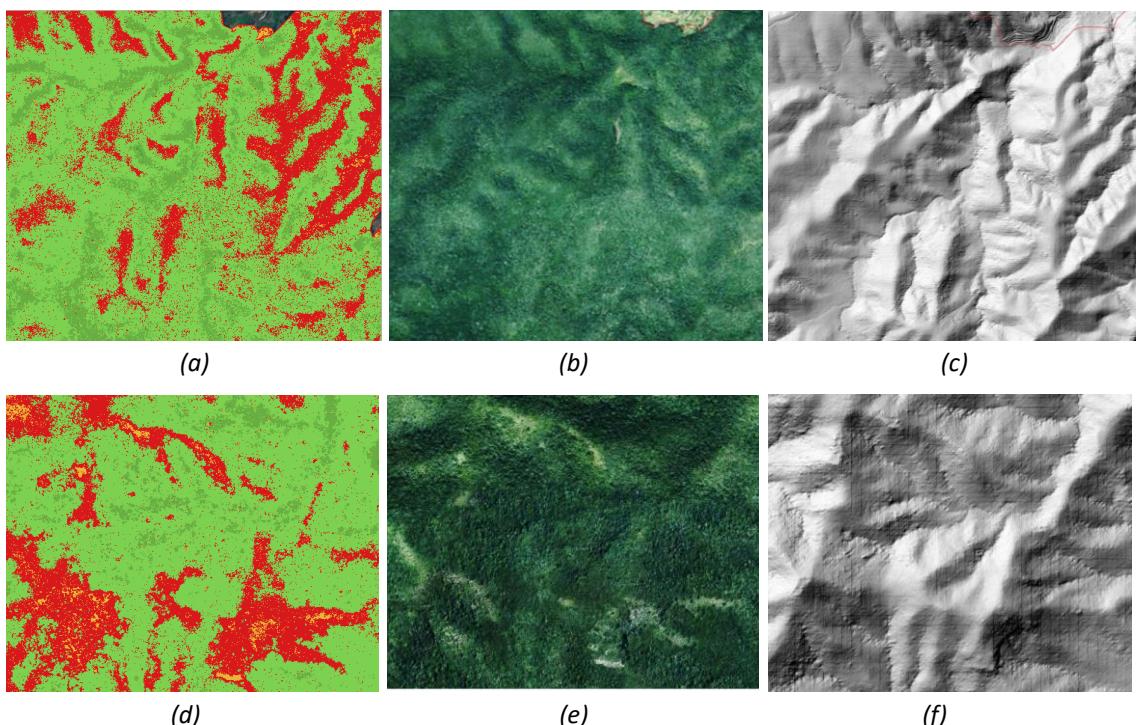
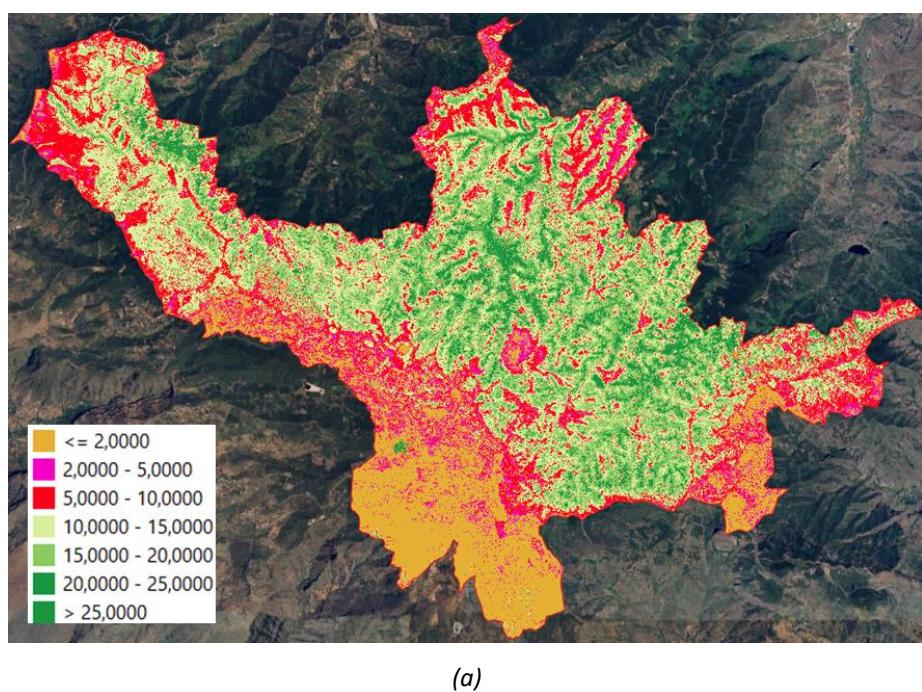
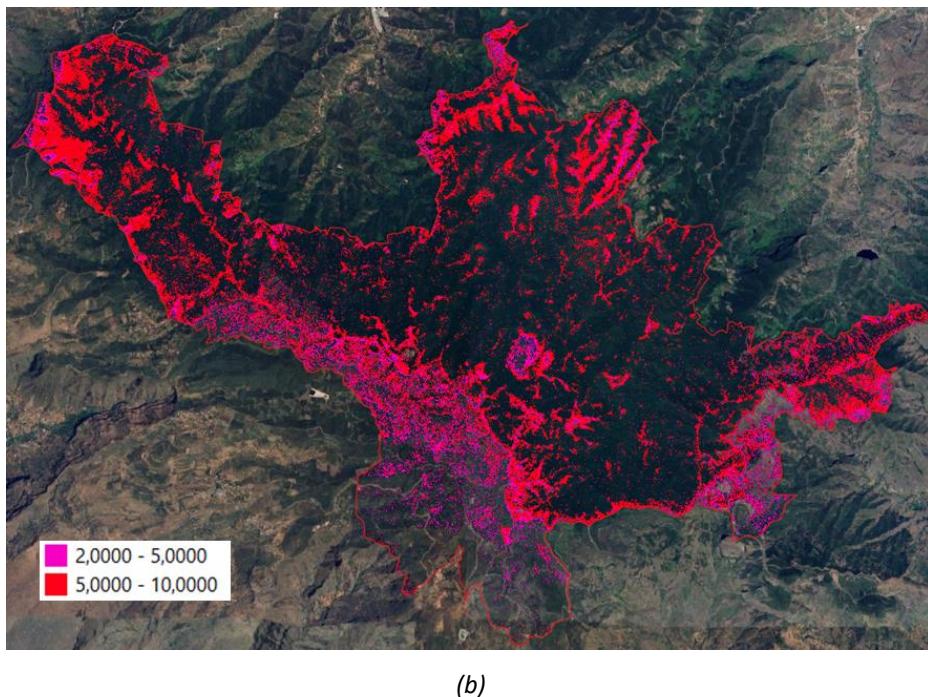


Figura 4.26. Zonas elevadas del PNG donde se aprecia desvitalización, identificadas en color rojo. (a), (d) Modelo digital del dosel escalado. (b), (e) Vista Satelital de Google. (c), (f) Modelo digital del terreno.

Para un análisis visual más detallado, se ha generado el modelo del dosel del PNG con una escala de colores con mayor resolución. En la figura 4.27 se muestran los resultados obtenidos.



(a)



(b)

Figura 4.27. (a) Mapeo de mayor resolución del dosel del PNG respecto a la altura. (b) Zonas detectadas con problemas de desvitalización según análisis estadístico.

4.4. Análisis con datos multiespectrales

Primeramente, se evalúan y realizan las tareas propuestas para el preprocesado de las imágenes multiespectrales con el objetivo de corregir los datos de base y buscar la mayor precisión y fiabilidad posible en los resultados que se proponen obtener. La cadena de preprocesado, como se mostró en el capítulo anterior, sigue la secuencia mostrada en la Figura 4.28.

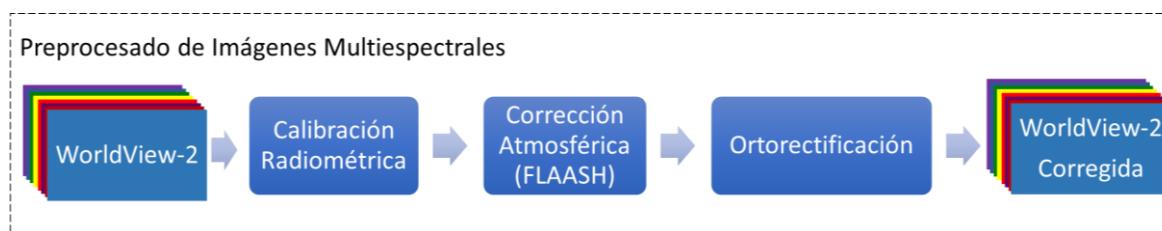


Figura 4.28. Diagrama de bloques del preprocesado de imágenes multiespectrales.

Una vez rectificada la imagen espectral, el objetivo es generar un mapa de vigorosidad vegetal del PNG para la identificación de zonas de desvitalización. En el presente apartado se comentan las etapas de procesamiento necesarias para el desarrollo de esta tarea (Figura 4.29).

Capítulo 4. Análisis del estado de salud vegetal en el Parque Nacional de Garajonay

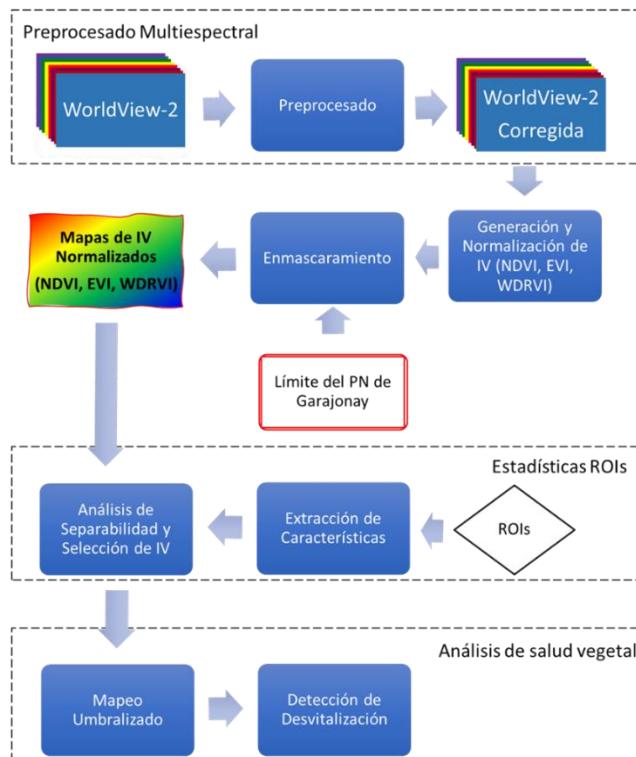


Figura 4.29. Metodología para el análisis de la salud vegetal del PNG.

4.4.1. Preprocesado multiespectral

Se parte de la imagen multiespectral captada por el satélite de muy alta resolución WorldView-2 el 22 de agosto de 2020. En la Figura 4.30 se muestra dicha imagen representada en color verdadero (RGB), enmascarada según el contorno del Garajonay.

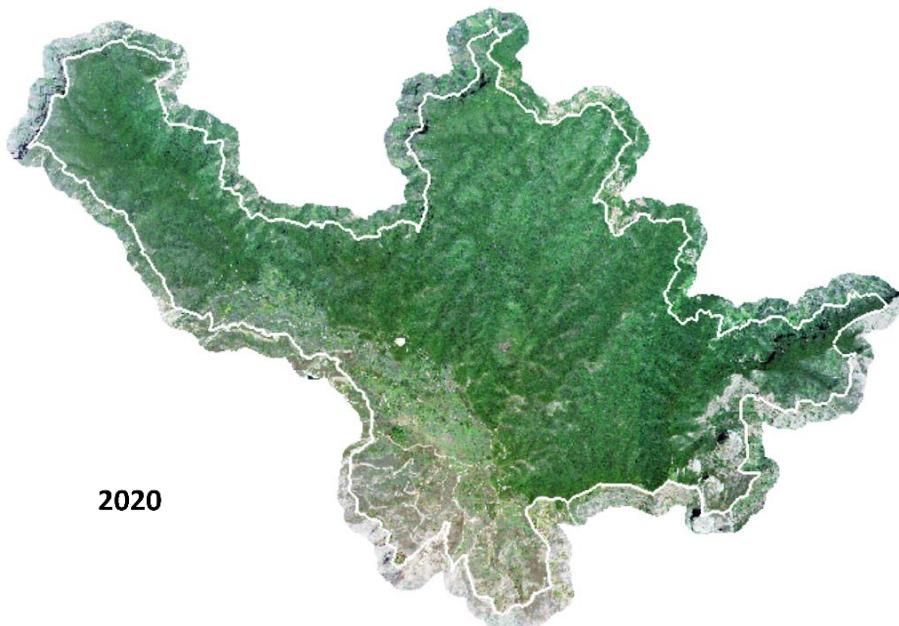


Figura 4.30. Imagen multiespectral de WorldView-2 en RGB.

➤ **Calibración radiométrica**

La calibración radiométrica se realizó empleando la herramienta *Calibrate WorldView* del paquete de Corrección Radiométrica incluidos en el software ENVI. Esta herramienta permite de forma automatizada la conversión de la radiancia relativa en radiancia absoluta empleando los factores de calibración del archivo de metadatos de WorldView [76].

➤ **Corrección atmosférica (FLAASH)**

Para la corrección atmosférica, como se comentó anteriormente, se propone emplear el método FLAASH. ENVI proporciona la herramienta de corrección automática *FLAASH Atmospheric Correction* dentro del módulo Corrección Atmosférica del paquete Corrección Radiométrica.

Para su correcto funcionamiento, el algoritmo necesita conocer una serie de parámetros relacionados con el sistema teledetector empleado para captar las imágenes, la propia imagen, la zona y la atmósfera para simular la visibilidad y un modelo atmosférico y de aerosoles a partir del cual realizar las correcciones. A continuación, se comentan los parámetros de entrada necesarios según cada modelado [77].

a) Modelado de la geometría de visualización

Para los instrumentos que utilizan una geometría de visualización no nadir, se deben especificar los ángulos cenital y acimutal. El ángulo cenital en el sensor es el ángulo entre la línea de visión y el cenit (entre 90 y 180 grados). El ángulo de acimut es el acimut (ángulo entre la línea de visión y el norte) del sensor visto desde el suelo (entre -180 y 180 grados). Esta información está disponible en el archivo de metadatos de la imagen. En nuestro caso, el ángulo cenital tiene un valor de 163.8º, mientras que el ángulo de acimut tiene un valor de 123.1º [78].

Durante esta etapa será necesario introducir los parámetros: (1) latitud y longitud del centro de la escena, (2) fecha y hora de captación de la imagen, (3) altitud del sensor en kilómetros sobre el nivel del mar, (4) ángulos cenit y acimutal [78], [79].

b) Modelado atmosférico

Se selecciona la atmósfera estándar del modelo MODTRAN correspondiente. Los modelos de atmósfera posibles son: invierno subártico (SAW), invierno de latitud media (MLW), tropical (T), verano de latitud media (MLS), verano subártico (SAS) y estándar de Estados Unidos. El modelo correspondiente al caso de estudio dependerá del mes de la toma de imagen y la latitud de la

Capítulo 4. Análisis del estado de salud vegetal en el Parque Nacional de Garajonay

zona, según muestra la Tabla 4.7. La imagen se tomó el 22/08/2020 y corresponde al Parque Nacional de Garajonay, por lo que se elige el modelo tropical [78].

Tabla 4.7. Tabla de selección de modelo atmosférico en función de la latitud y el mes [78].

Latitude (°N)	Jan	March	May	July	Sept	Nov
80	SAW	SAW	SAW	MLW	MLW	SAW
70	SAW	SAW	MLW	MLW	MLW	SAW
60	MLW	MLW	MLW	SAS	SAS	MLW
50	MLW	MLW	SAS	SAS	SAS	SAS
40	SAS	SAS	SAS	MLS	MLS	SAS
30	MLS	MLS	MLS	T	T	MLS
20	T	T	T	T	T	T
10	T	T	T	T	T	T
0	T	T	T	T	T	T

c) Modelado de aerosoles

Los posibles modelos de aerosoles considerados por FLAASH son [78]:

- Rural: representa aerosoles en áreas no fuertemente afectadas por fuentes urbanas o industriales, donde los tamaños de partículas son una combinación de dos distribuciones, una grande y otra pequeña.
- Marítimo: representa la capa límite sobre los océanos o continentes bajo un viento predominante del océano, está compuesto por el rocío marino y el aerosol continental rural (que omite las partículas más grandes).
- Urbano: es una mezcla de 80 % de aerosol rural con 20 % de aerosoles similares al hollín, apropiado para áreas urbanas/industriales de alta densidad.
- Troposférico: se aplica a condiciones tranquilas y claras (visibilidad superior a 40 km) sobre la tierra y consiste en el componente de partículas pequeñas del modelo rural.

Dadas las características del PNG, ubicado en la isla de La Gomera, se escoge el modelo de aerosoles marítimo.

El resultado tras aplicar las correcciones radiométricas y atmosféricas serán imágenes con valores de la reflectividad a nivel de superficie, multiplicados por un factor de 10000. En la Figura 4.29 se puede apreciar como las firmas espectrales obtenidas tras las correcciones son más adecuadas a la forma característica de la superficie a la que representan. En este caso, se tomó un ejemplo de píxel de vegetación.

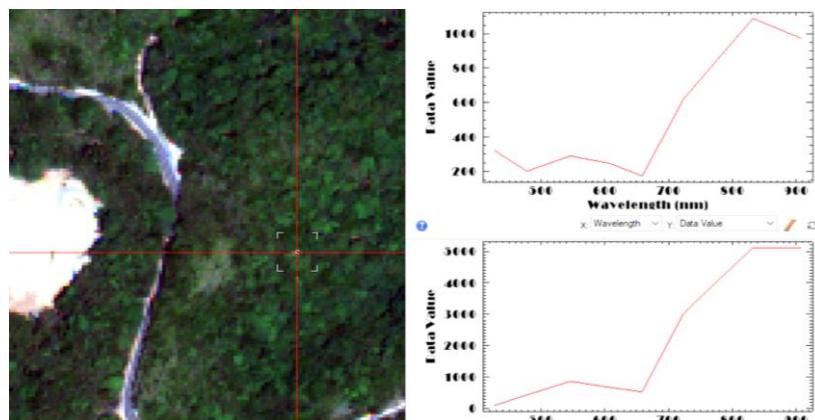


Figura 4.31. Firmas espectrales antes (superior) y después de la corrección para una superficie vegetal.

➤ Ortorectificación

ENVI ofrece una solución de ortorectificación RPC (*Rational Polynomial Coefficient*) con la herramienta *RPCOrthorectification*. Para emplear esta herramienta se requiere contar con una imagen con un modelo de sensor RPC o RSM (*Replacement Sensor Model*) y con un modelo digital del terreno (DTM). Se requieren coeficientes RPC o RSM para que la expansión de la función racional convierta las coordenadas del suelo en coordenadas del sensor. Sin información de elevación de un DTM, los RPC solo proporcionan una ubicación geográfica aproximada. De esta forma se logra asociar las imágenes RPC a un modelo de elevación del terreno, mientras mayor resolución espacial tenga el DTM, más precisa será la ortorectificación [80].

Para el desarrollo de esta tarea se emplea un DTM de precisión de 2m de resolución generado en 2015, proporcionado por el Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG). En la Figura 4.32 se muestra una representación de dicho DTM en una escala de color según información de altimetría.

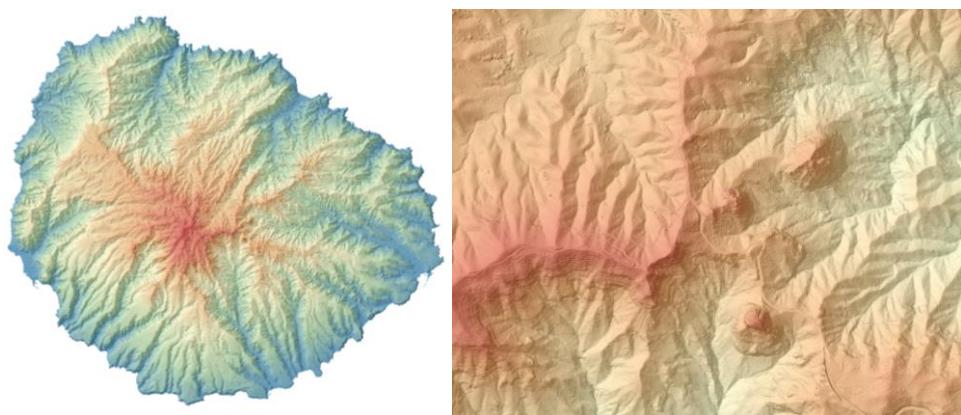


Figura 4.32. DTM de la isla de La Gomera.

Los productos adquiridos de WorldView-2 (*Level 2 orthoready*) incluyen modelos de sensores RPC, por lo que no supone un problema emplear la herramienta RPCOrthorectification para realizar su ortorectificación, junto con el MDT obtenido.

Para visualizar el efecto causado en la imagen tras este proceso, en la imagen a continuación se muestra una representación superpuesta de la imagen antes y después de ortorectificarla con ortofoto, aplicando transparencia para que puedan apreciarse ambas simultáneamente. En la Figura 4.33 se puede apreciar las transformaciones en la localización de los píxeles.

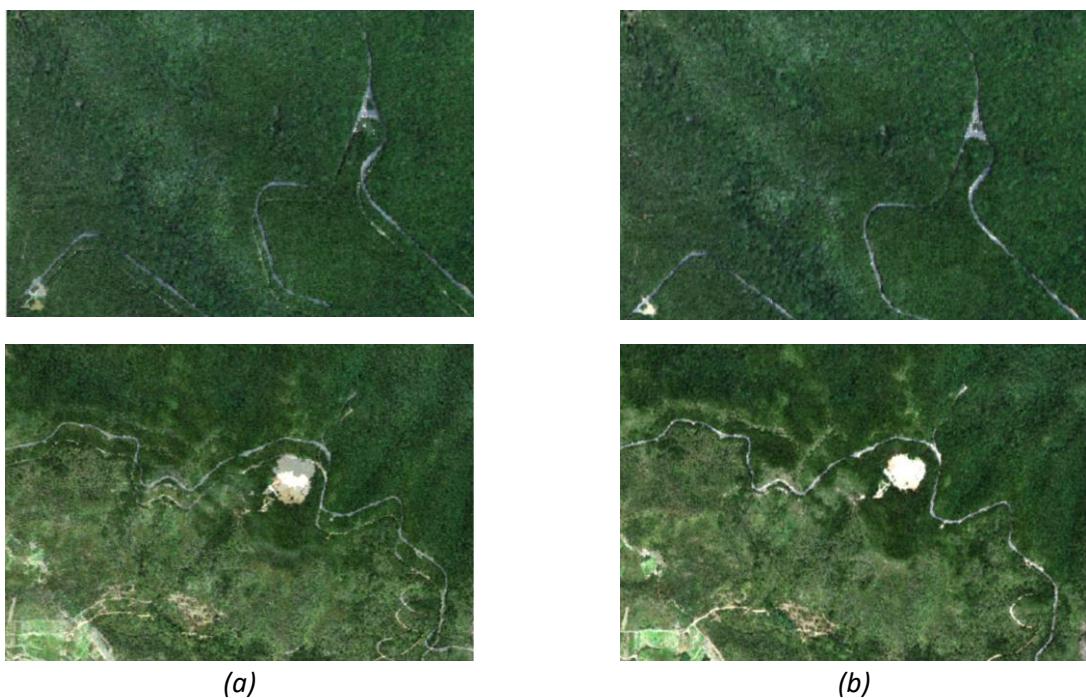


Figura 4.33. Superposicion de ortofoto con: (a) imagen de WV-2 sin ortorectificacion y (b) imagen de WV-2 ortorectificada geométricamente.

4.4.2. Generación de mapas de índices de vegetación

Una vez corregida la imagen de WorldView-2, se procede a obtener los índices de vegetación. En nuestro caso, como se comentó anteriormente, se procede calcular los índices NDVI, EVI y WDRVI [81].

Una vez obtenidos los IV, se normalizan (entre 0 y 1) para facilitar su comparación. En este punto, se tienen los valores de IV de toda la imagen de WV-2 que contiene al Garajonay. Se lleva a cabo un proceso de enmascaramiento para separar los resultados de únicamente la región comprendida por el PNG. El enmascaramiento se realiza manualmente a partir de la herramienta *ROI tools* de ENVI. Para ello es necesario emplear un archivo de contorno (*shape*) que contiene

información sobre los límites del PN de Garajonay para generar una región de interés (ROI) que se convierte en la máscara a aplicar sobre la imagen de IV.

En la figura 4.34 se representa el resultado obtenido para cada índice, empleando una paleta de colores arcoíris invertida.

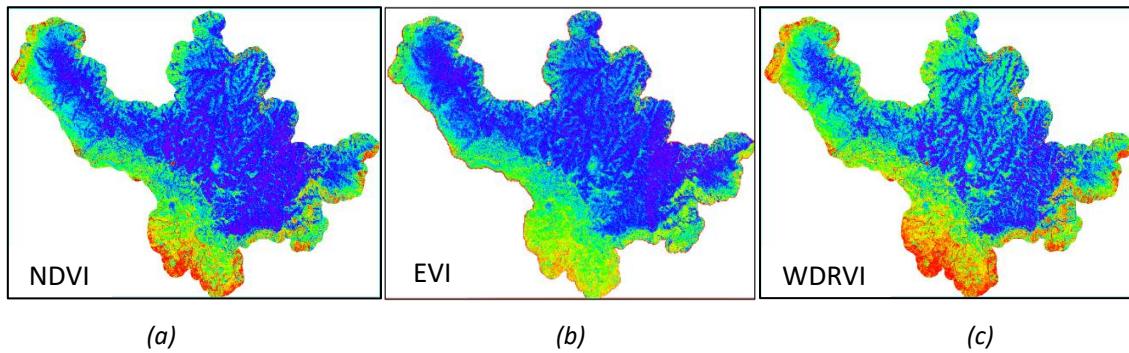


Figura 4.34. Mapa de índices de vegetación del PNG: (a) NDVI, (b) EVI y (c) WDRVI.

4.4.3. Estimación estadística para la selección de umbrales de desvitalización

En este apartado se definen las bases que se emplean para filtrar y clasificar los mapas de índices generados con el objetivo de obtener los mapas de vigorosidad. Para ello, es necesario realizar un estudio estadístico de los valores obtenidos para cada índice de vegetación en zonas de interés donde exista una diferencia evidente entre vegetación vigorosa y desvitalizada.

Para el estudio, se propone generar una base de datos de 100 regiones de interés con cuatro clases fáciles de identificar según su firmapectral (Figura 4.35): (a) vegetación sana, (b) vegetación desvitalizada, (c) suelo desnudo y (d) suelo construido. En la Figura 4.36. se muestra un ejemplo de un píxel seleccionado como vegetación desvitalizada comparado con su ortofoto correspondiente, a modo de validación de la selección.

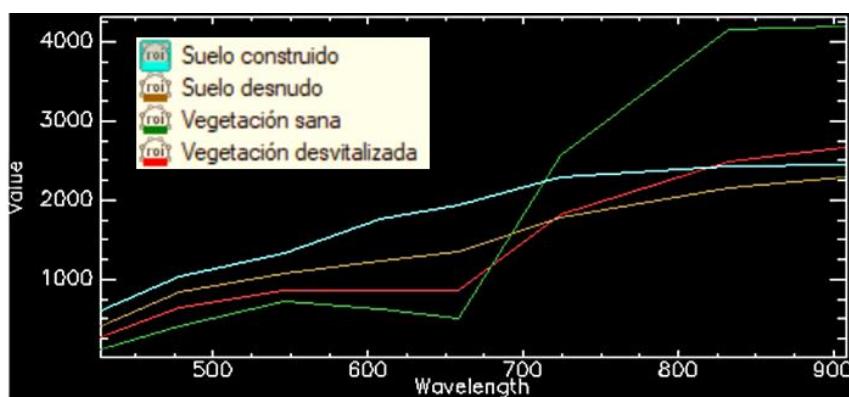


Figura 4.35. Firmas espectrales de las distintas clases.

Capítulo 4. Análisis del estado de salud vegetal en el Parque Nacional de Garajonay

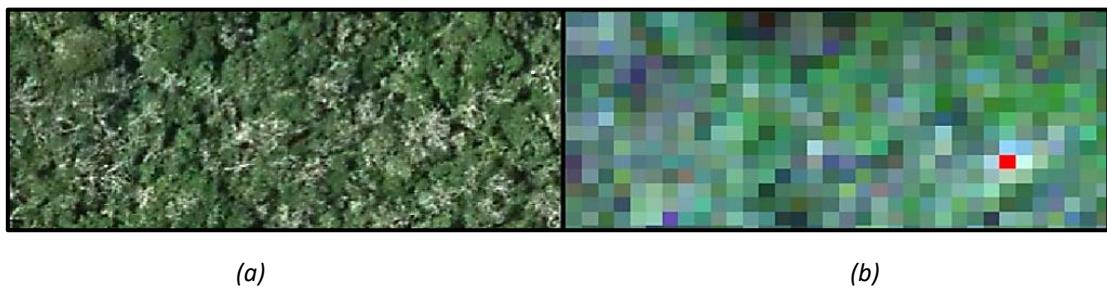
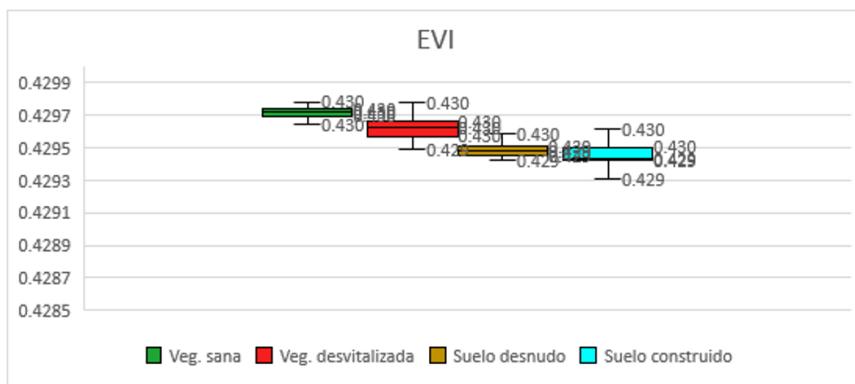
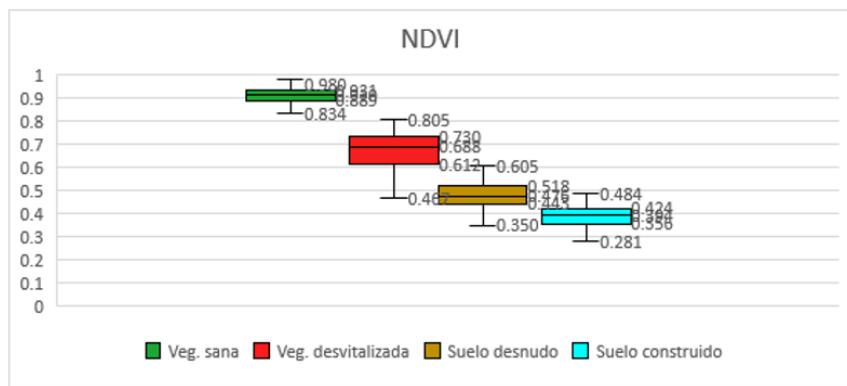


Figura 4.36. Ejemplo ROI de vegetación desvitalizada. (a) Ortofoto. (b) Imagen WorldView-2.

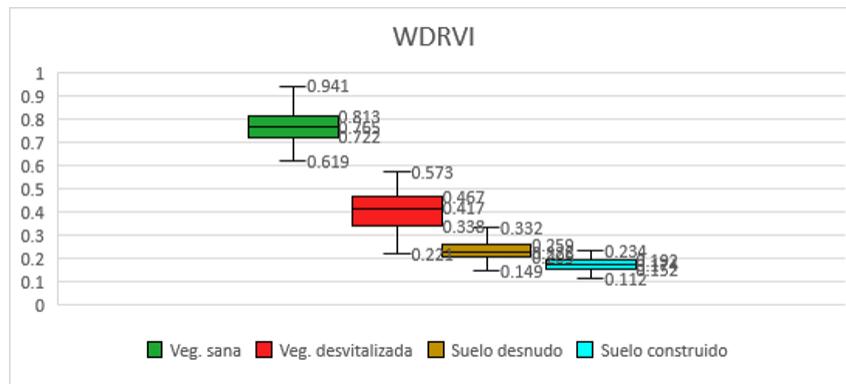
El análisis se ha realizado empleando el diagrama de cajas y bigotes de Excel, que nos permite visualizar la distribución de los valores numéricos, así como los valores medios, la asimetría, y las diferencias entre clases para cada IV. A partir de los índices normalizados, se generan los diagramas (Figura 4.37). En los gráficos se aprecia la dificultad de discriminación entre ciertas clases, aunque en general, NDVI y WDRVI permiten discriminar bastante bien los píxeles de vegetación desvitalizada respecto del resto de clases aplicando los umbrales adecuados. Se utilizará el índice WDRVI, pues es el que mejores resultados aporta para la separación entre vegetación sana y desvitalizada, y el suelo.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.37. Estadísticas de vegetación para los índices: (a) EVI, (b) NDVI y (c) WDRVI.

Finalmente, se calculan los umbrales para discriminar las clases a partir de las que se generarán los mapas de vigorosidad del PNG empleando el índice WDRVI normalizado.

Tabla 4.8. Clases y umbrales de índice WDRVI para análisis de vigorosidad del PNG.

VIGOROSIDAD	WDRVI
SUELO	$H \leq 0,30$
VEGETACIÓN DESVITALIZADA	$H > 0,30$ $H \leq 0,55$
VEGETACIÓN FRONDOSA	$H > 0,55$

4.4.3. Análisis de estado de salud de la vegetación

Una vez obtenida y analizada la base de datos de regiones para definir los criterios y valores de umbralización, se puede obtener el mapa de vigorosidad del PNG para la detección y análisis de zonas desvitalizadas.

Para la generación del mapa de las clases propuestas, se emplea la herramienta de árbol de decisión de ENVI. Los árboles de decisión permiten realizar tareas de clasificación. Se trata de un flujo jerárquico en el que se van estableciendo condiciones y luego estas se van ramificando en otras [82], [83].

Para clasificar el mapa de índice WDRVI normalizado como nodo raíz de nuestro árbol. En el primer nodo se emplea el valor de umbral más bajo (0.30) para diferenciar entre suelo o matorral y vegetación. Se define, seguidamente, a uno de sus hijos como nodo interno para diferenciar entre vegetación frondosa y desvitalizada, empleando el otro valor umbral (0.55). La representación gráfica del árbol de decisión resultante se muestra en la Figura 4.38.

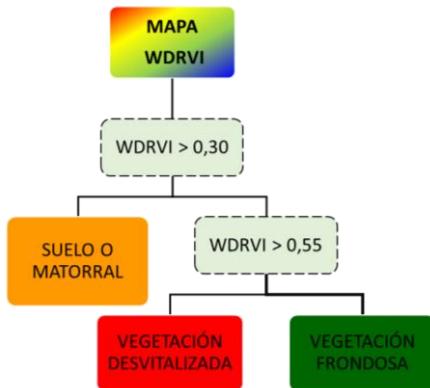
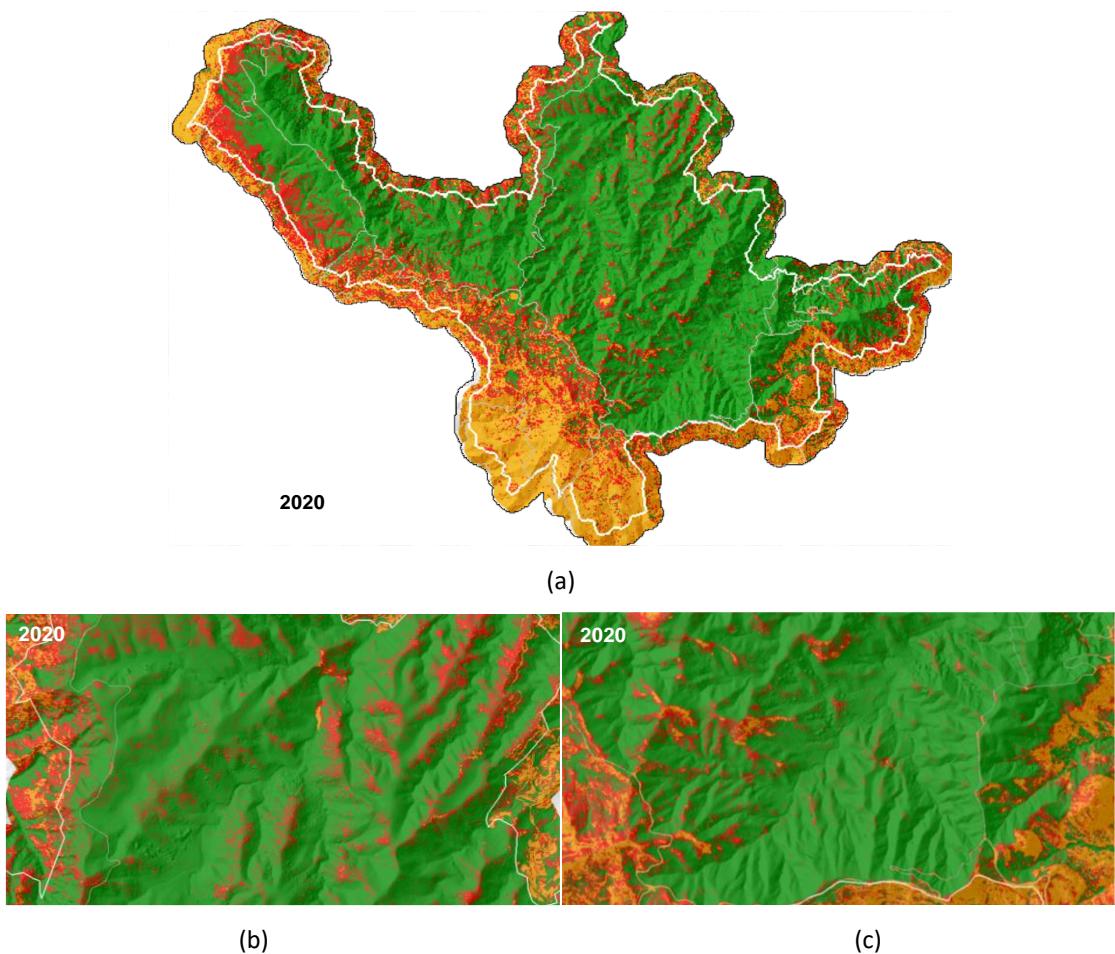


Figura 4.38 Árbol de decisión empleado.

Se procede a generar y analizar el mapa de salud vegetal del PNG. Se identifican zonas con problemas de desvitalización en con color rojo en la Figura 4.39. En la imagen WorldView-2 se ha superpuesto el mapa de desvitalización al modelo digital de elevación del terreno y se ha dejado una zona buffer alrededor del Parque, cuyos límites quedan reflejados en color blanco.



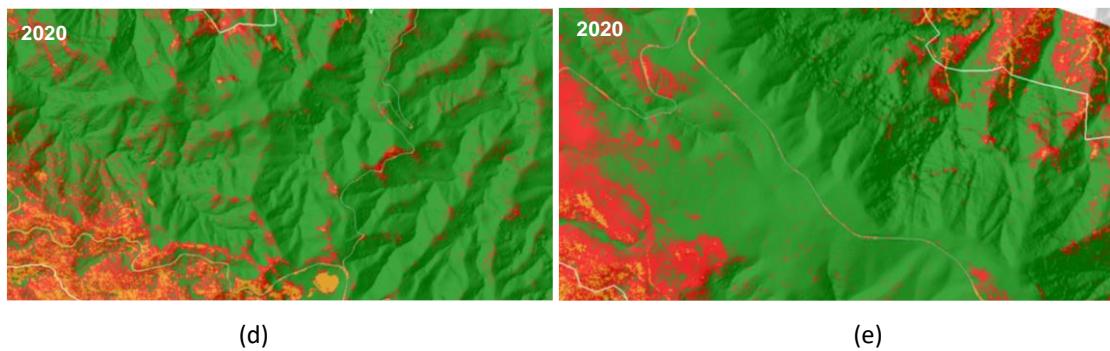


Figura 4.39. (a) Mapa de vigorosidad de todo el PNG a partir del índice WDRVI normalizado. Detalle del mapa en zona: (a) Norte, (b) Sureste, (c) Sur y (d) Oeste.

4.5. Análisis comparativo multisensor

En esta sección se incluyen los mapas de vigorosidad obtenidos a partir de datos LiDAR de GRAFCAN de 2017 y a partir de los datos multiespectrales del satélite WorldView-2 de 2020.

En Figura 4.37 se puede ver como las zonas de menor vigor vegetal son comunes los dos mapas generados. En cualquier caso, queda patente que las zonas forestales localizadas en los fondos de los barrancos son las que alcanzan mayor vigor y altura. Específicamente, la región de bosques de laurisilvas situada en la zona Norte del Garajonay es la que presenta mayores problemas de vigorosidad vegetal.

Se ha de tener en consideración que la complejidad del relieve del Parque, las diferencias en cuanto a la tecnología de teledetección empleada y las distintas resoluciones disponibles, dificultan la detección de zonas vigorosas y desvitalizadas. En cualquier caso, se puede afirmar que se obtuvieron patrones similares de vigorosidad vegetal, a pesar de emplear datos multisensor que proporcionan información diferente naturaleza (alturas y firmas espectrales). Este hecho sirve como validación recíproca de las metodologías desarrolladas para el análisis de vigorosidad.

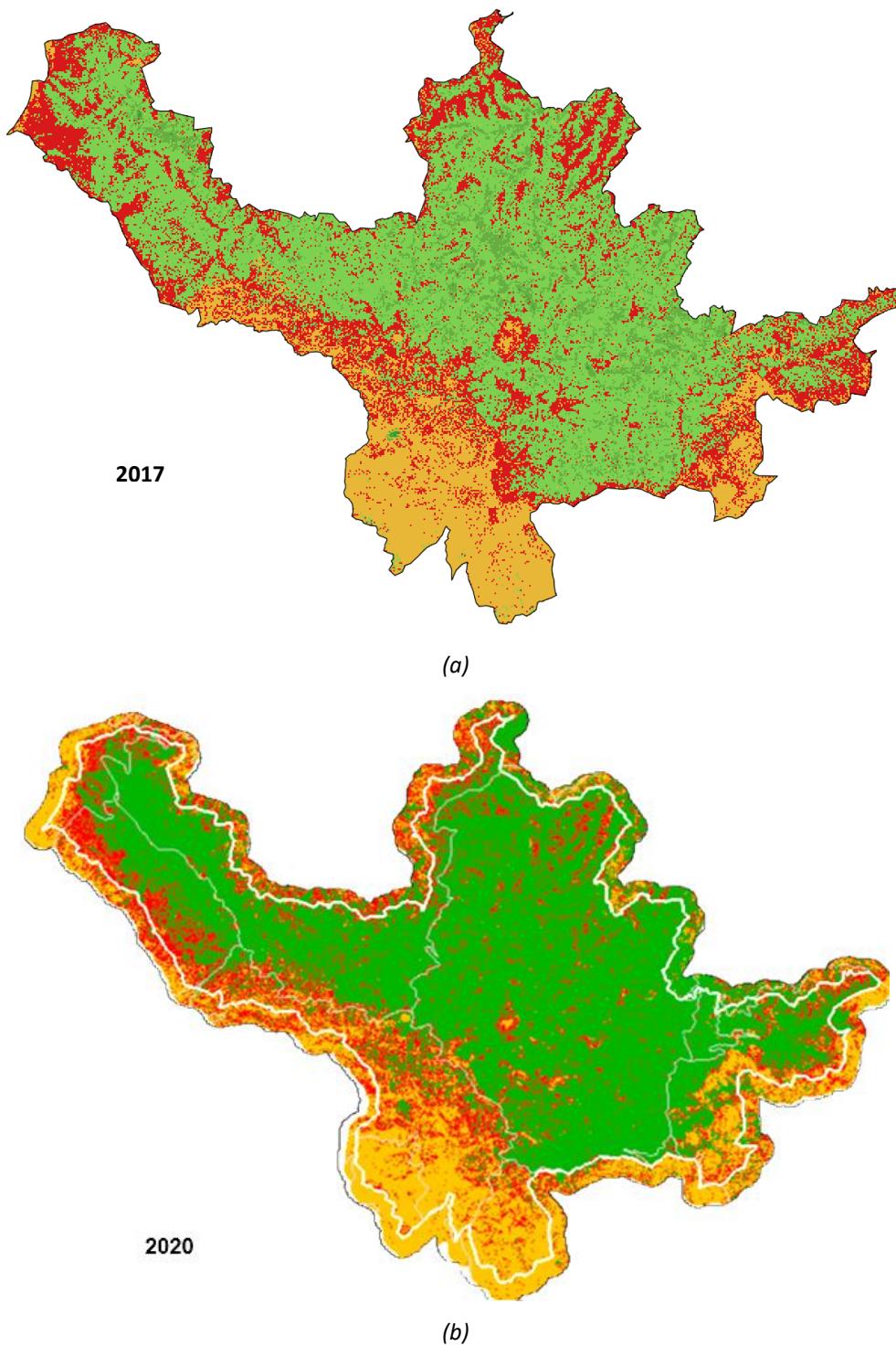


Figura 4.40. Mapa de vigorosidad del PNG generado a partir de datos: (a) LiDAR y (b) multiespectrales.

Capítulo 5. Clasificación de especies forestales en el Parque Nacional de Garajonay

En este capítulo se aborda el estudio y la realización de mapas de especies forestales del Parque Nacional de Garajonay a partir de datos LiDAR e imágenes multiespectrales.

5.1. Introducción

A lo largo de este capítulo se describe la metodología empleada para obtener un mapa de especies del Parque Nacional de Garajonay. Se generará tanto a partir de datos LiDAR como a partir de imágenes multiespectrales.

Como se ha comentado anteriormente una de las formaciones vegetales más abundante en todo el parque es la laurisilva. Debido a la similitud espectral y altimétrica entre las distintas especies de laurisilvas se hace muy difícil discriminarlas entre ellas. En este contexto, se procede entonces a analizar la viabilidad de realizar una clasificación donde se distingan las laurisilvas de los brezales, con menor altura y hojas aciculares brillantes, a diferencia de las laurisilvas, con hojas más anchas y ovaladas.

5.2. Datos de campo

Como se comentó en el anterior capítulo, para caracterizar la totalidad de la zona de estudio resulta útil emplear las parcelas de nivel global, en las que se detectaron una totalidad de 2791 ejemplares. El objetivo ha sido identificar características relevantes diferenciales entre las distintas especies para emplearlas en su posterior clasificación.

Como se ha indicado, se hace complejo la discriminación precisa entre especies. En la Figura 5.1 se muestra la similitud estructural y morfológica entre las distintas especies forestales más representativas. Específicamente, destaca el parecido entre diferentes especies de laurisilvas, como se muestra en las figuras (c), (d), (e), (f), (g), (h) e (i).

Capítulo 5. Clasificación de especies forestales en
el Parque Nacional de Garajonay



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)



(i)

Figura 5.1. Imágenes de especies identificadas en el Parque Nacional de Garajonay. (a) *Erica canariensis*. (b) *Erica platycodon*. (c) *Persea indica* (viñátigo). (d) *Laurus novocanariensis* (laurel). (e) *Picconia excelsa* (palo blanco). (f) *Morella faya* (faya). (g) *Apollonias barbujana* (barbusano). (h) *Ilex canariensis* (Acebiño). (i) *Ocotea foetens* (tilo).

Capítulo 5. Clasificación de especies forestales en el Parque Nacional de Garajonay

A partir de los datos de las especies identificadas en el muestreo en campo de las parcelas globales, se seleccionan las especies de laurisilvas y brezales con un número significativo de ejemplares y se generaron los datos estadísticos que se muestran en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Datos de campo de especies detectadas en parcelas a nivel global.

ESPECIES VEGETALES DEL PNG						
CLASIFICACIÓN	ESPECIES	Nº DE EJEMPLARES	ALTURA MÁXIMA	ALTURA MÍNIMA	ALTURA MEDIA	DESVIACIÓN
BREZAL	ERICA CANARIENSIS	903	22,2	2,50	8,71	2,70
LAURISILVAS	ILEX CANARIENSIS	557	27	4,4	12,95	4,26
	LAURUS NOVOCANARIENSIS	637	32,6	1,34	15,92	5,07
	MORELLA FAYA	552	32,9	1,80	14,39	6,02
	PERSEA INDICA	83	32,90	2,80	21,98	6,65
	PICCONIA EXCELSA	52	21,90	6,40	12,29	3,13

5.3. Clasificación a partir de datos LiDAR

En la Figura 5.2 se muestra la metodología empleada para generar el mapa de especies clasificadas del Parque Nacional de Garajonay a partir de datos de altura LiDAR generados anteriormente.

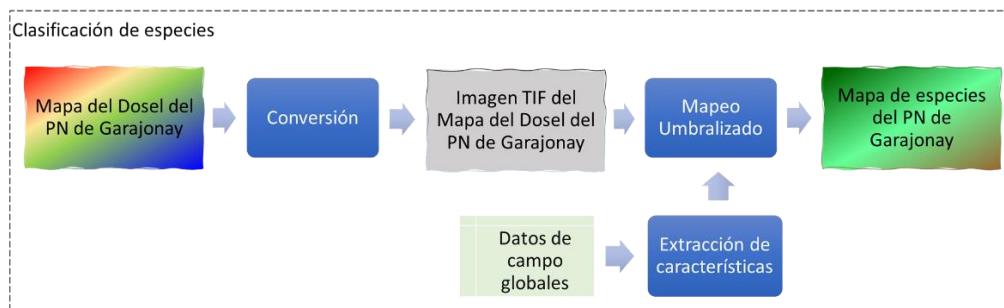


Figura 5.2. Diagrama de bloques del proceso de clasificación de especies.

Para el desarrollo de esta etapa se emplea el software avanzado de análisis geoespacial ENVI. En los siguientes apartados se describen las etapas del proceso realizado.

➤ Conversión

Para visualizar en ENVI el archivo ráster CHM generado en etapas anteriores será necesario convertirlo a archivo TIF. El software QGIS nos permite realizar la conversión de ASCII a TIF directamente de forma manual. Una vez generada la imagen TIF del dosel del PN de Garajonay podrá visualizarse y procesarse en ENVI.

➤ Mapeo umbralizado

Capítulo 5. Clasificación de especies forestales en el Parque Nacional de Garajonay

En esta etapa se clasificarán los dos tipos de vegetación de interés (laurisilvas y brezales) en función de sus valores típicos de altura en el PNG usando como clasificador un árbol de decisión.

Se realiza un análisis más profundo de las muestras de campo globales. En la Figura 5.3 se representan los histogramas de cada especie según distintos rangos de alturas. Los histogramas muestran el número de árboles existentes para cada rango.

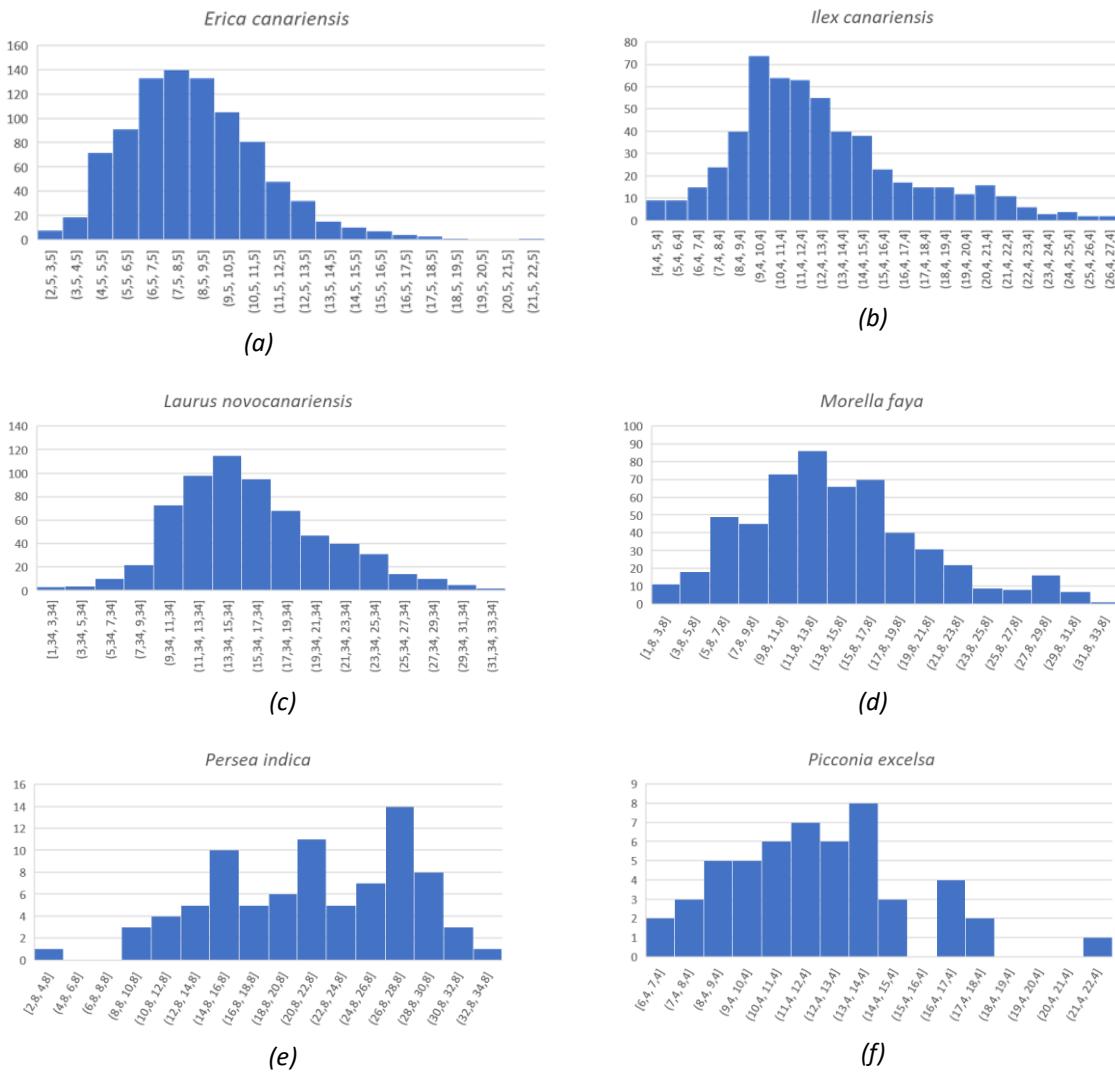


Figura 5.3. Histogramas de cada especie según niveles de altura.

Se aprecia que la mayoría de las especies siguen una distribución gaussiana. Sin embargo, puesto que el objetivo es identificar los umbrales de altura que permitan discriminar las especies, en la Figura 5.4 se representan los diagramas de cajas de las especies más representativas.

Capítulo 5. Clasificación de especies forestales en el Parque Nacional de Garajonay

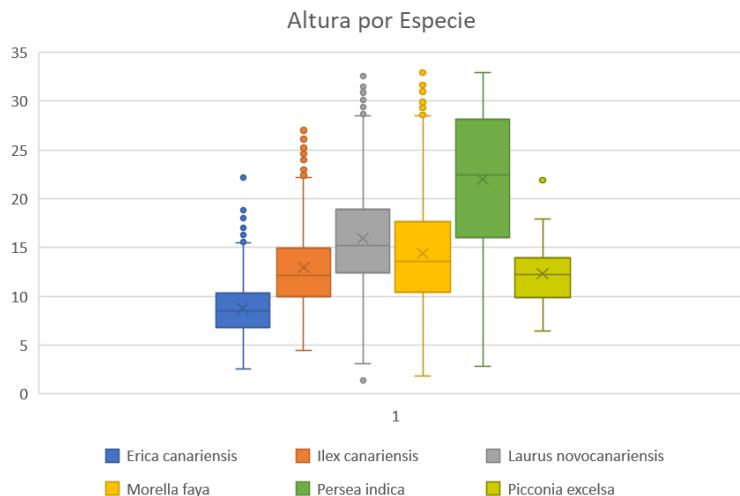


Figura 5.4. Diagrama de cajas de especies más representativas de según altura.

En esta representación sí que se evidencian mejor los parámetros para establecer los umbrales de clasificación. El grupo de especies identificadas a la derecha corresponden a laurisilvas, mientras que el de la izquierda (*Erica canariensis*) representa la especie de brezal predominante. El objetivo es obtener los rangos de altura que permitan diferenciar entre (i) suelo desnudo o vegetación herbácea o matorral, (ii) brezales y (ii) laurisilvas.

En primer lugar, se aprecia que para alturas de entre 1 y 2 m no existe vegetación, incluso para valores cercanos mayores a éstos existen muy pocas especies de laurisilvas. Por tanto, la primera decisión pasa por establecer el primer umbral (Umbral 1) entre 1 y 2 m. Este parámetro diferencia lo que representa vegetación baja o suelo de brezales.

Por otro lado, podemos ver que los valores máximos de altitud para los que existe una cantidad representativa de brezales se encuentran entre los 9 y 11 m. Sobre el mismo rango se encuentran los límites inferiores de altitud en que empiezan a identificarse gran número de especies de laurisilva. Entonces, se fija como segundo umbral (Umbral 2) valores de entre 9 y 11 metros. Esta cota representa el valor a partir del cual prácticamente deja de evidenciarse el brezal y comienzan a identificarse muestras de laurisilva. En la Tabla 5.2. se muestran el criterio empleado para definir las clases, en función de los umbrales de altura.

Tabla 5.2. Criterio de clasificación de especies.

CLASIFICACION DE ESPECIES	ALTURA (H)
SUELO O VEGETACIÓN HERBÁCEA/ARBUSTIVA	$H \leq \text{UMBRAL 1}$
BREZAL	$H > \text{UMBRAL 1}$ $H \leq \text{UMBRAL 2}$
LAURISILVA	$H > \text{UMBRAL 2}$

Capítulo 5. Clasificación de especies forestales en el Parque Nacional de Garajonay

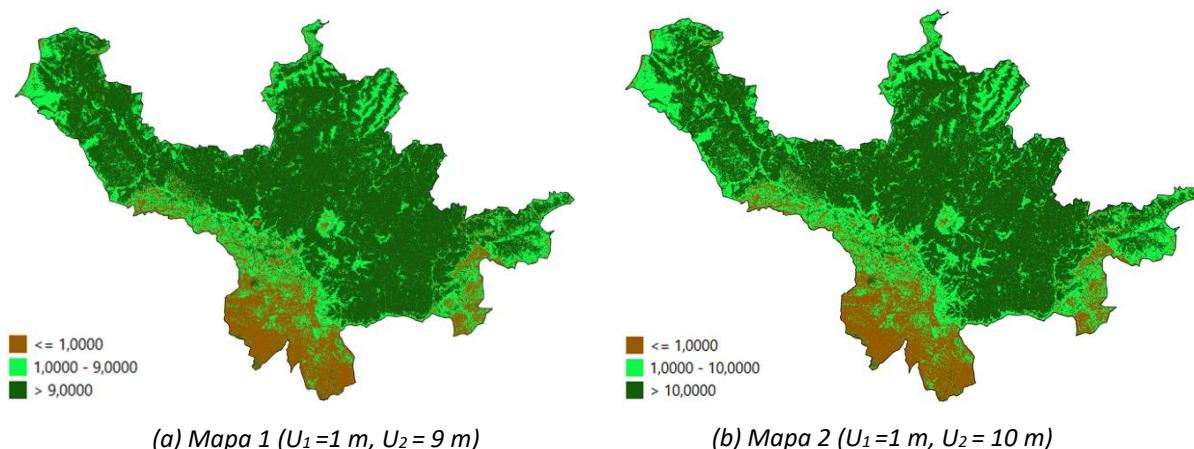
En base a los posibles valores de umbrales analizados, se generarán y analizarán 6 mapas de clasificación, como se muestra en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3. Relación de mapas a generar en función de los valores umbrales.

MAPAS	UMBRAL 1	UMBRAL 2
MAPA 1	1	9
MAPA 2	1	10
MAPA 3	1	11
MAPA 4	2	9
MAPA 5	2	10
MAPA 6	2	11

La clasificación de los mapas se realiza empleando las herramientas de visualización del software QGIS, empleado hasta el momento para la representación y análisis de los modelos digitales generados a partir de datos LiDAR. Se define una paleta de colores con los valores umbrales para cada caso.

En la Figura 5.5 se presentan los mapas generados según las distintas combinaciones de umbrales indicadas en la Tabla 5.3. Se identifican bastantes similitudes entre éstos. Se procede realizar un análisis visual de los mapas de especies clasificados respecto al mapa de vegetación proporcionado por la dirección del Parque Nacional de Garajonay, representado en la Figura 5.6 para validar los resultados. Este mapa se muestra la distribución de los tipos de vegetación dentro del Parque.



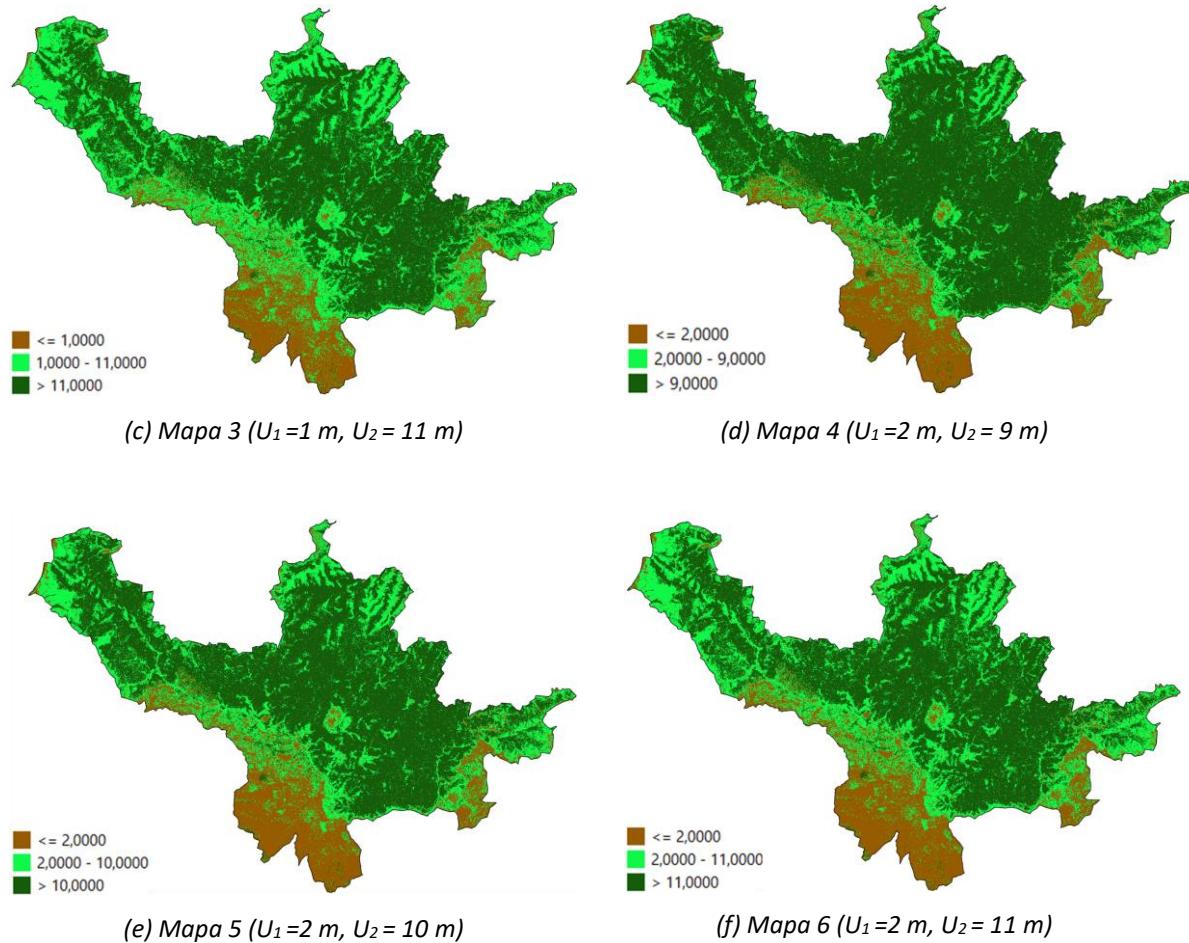


Figura 5.5. Mapas de especies del PNG generados a partir de datos LiDAR del 2017.

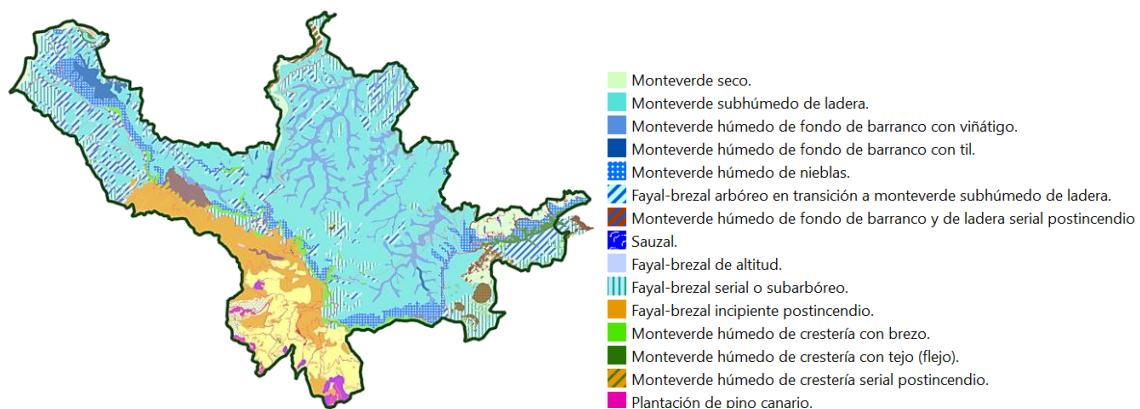


Figura 5.6. Mapa de especies proporcionados por la dirección del PNG.

En el contexto de este TFG, el interés se centra en las zonas de bosque y, por tanto, no se pretende analizar las zonas de matorrales o repoblación de las que no se dispone de datos precisos de campo. Para un análisis detallado de la clasificación realizada se procede a seleccionar una zona para estimar visualmente cuál de los mapas de especies generados tiene mayor índice de semejanza con respecto al mapa de especies clasificado de la dirección del PNG (Figura 5.7).

Capítulo 5. Clasificación de especies forestales en

el Parque Nacional de Garajonay

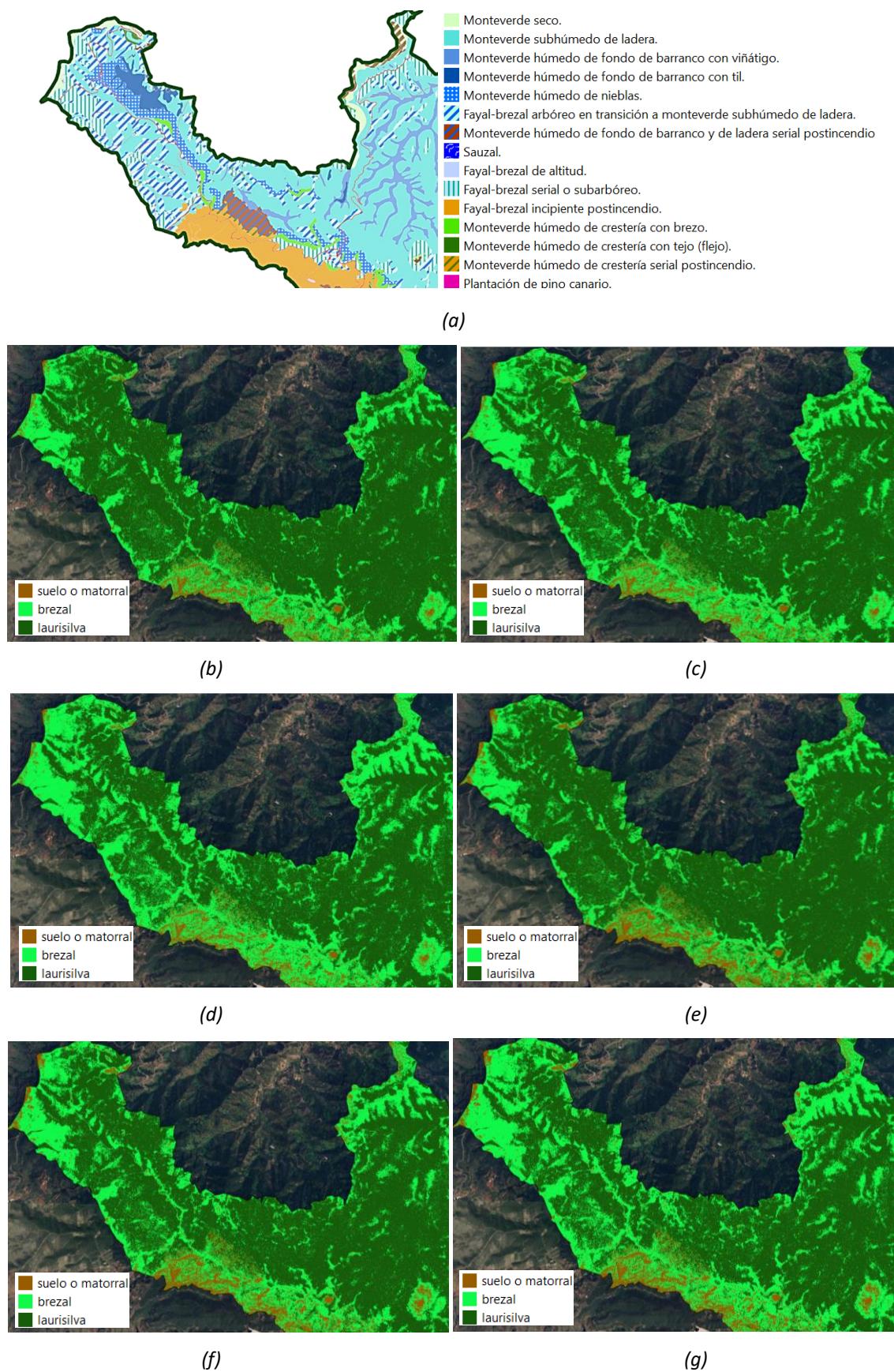


Figura 5.7. Ampliación zona Oeste de mapa de especies: (a) de la dirección del PNG, (b) Mapa 1, (c) Mapa 2, (d) Mapa 3, (e) Mapa 4, (f) Mapa 5, (g) Mapa 6.

El mapa que más semejanza muestra es el Mapa 3, correspondiente a los umbrales estimados de 1 y 11 metros para diferenciar suelo/matorral de brezal y brezal de laurisilva, respectivamente.

Teniendo en cuenta que la clasificación se ha basado únicamente en la información de la altura, las zonas de laurisilvas con menor vigor vegetal y, por tanto, menor altura, se pueden confundir con zonas de brezal. En la Figura 5.8 se muestra el mapa final de especies generado a partir del procesado de la nube de puntos LiDAR de GRAFCAN y el aportado por la dirección del Parque.

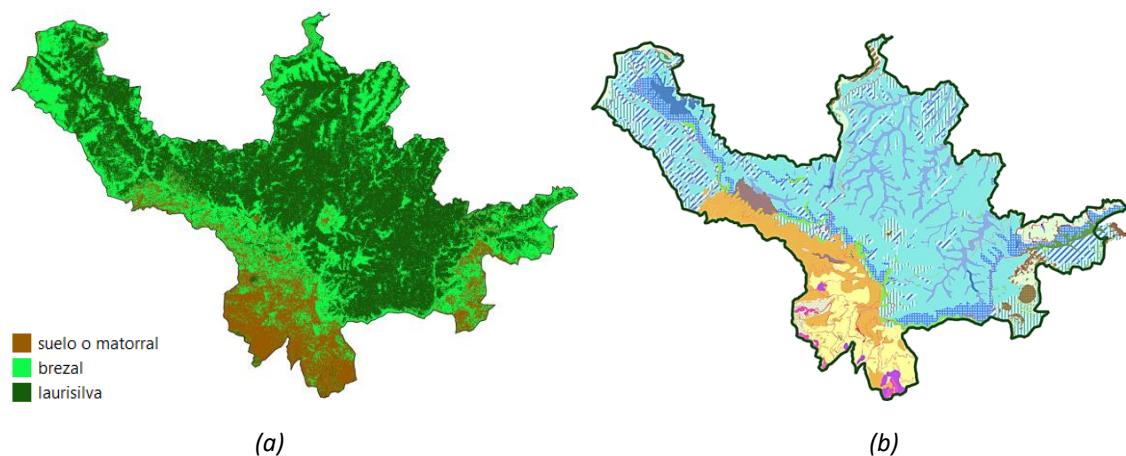


Figura 5.8. (a) Mapa de vegetación: (a) generado a partir de la nube de puntos LiDAR de GRAFCAN, y (b) proporcionado por la dirección del PNG.

5.4. Clasificación a partir de datos multiespectrales

El proceso de clasificación se realiza de forma supervisada, como se mencionó anteriormente. La metodología empleada para clasificar la vegetación del Parque Nacional de Garajonay se muestra en la Figura 5.9.



Figura 5.9. Metodología para la clasificación de especies con datos multiespectrales.

A pesar de que los datos de base provienen de un satélite de alta resolución espacial, las especies existentes en el PNG presentan grandes similitudes espectrales, lo que dificulta el proceso de diferenciación.

Capítulo 5. Clasificación de especies forestales en el Parque Nacional de Garajonay

El proceso de clasificación, al ser supervisado, requiere de una fase inicial de entrenamiento a partir de la selección de regiones geolocalizadas de interés que representen claramente las clases de vegetación que se propongan para la clasificación. Dadas las similitudes espectrales entre especies, como se ha indicado, se restringe la clasificación vegetal a laurisilvas y fayal-brezales, que, además, son los dos grupos de especies más abundantes y representativos en todo el PNG. Se emplearán dos clasificadores para las tres clases propuestas (laurisilva, fayal-brezal y suelo), SVM y SAM, que obtuvieron los resultados óptimos según estudios desarrollados previamente.

Las regiones de entrenamiento fueron proporcionadas por el PNG (Tabla 5.4). En la Figura 5.10 se aprecia un ejemplo de píxeles identificados como fayal-brezal y laurisilva.

Tabla 5.4. ejemplos de laurisilva y fayal-brezal geolocalizadas por todo el PNG.

PARCELAS	X	Y	TIPO DE BOSQUE	Latitud	Longitud
56	281346	3114637	LAURISILVA	28,139294	-17,226401
82	280830	3113602	LAURISILVA	28,129873	-17,231458
53	279836	3114644	LAURISILVA	28,139106	-17,241768
8	279327	3116598	LAURISILVA	28,156647	-17,247316
29	280368	3115629	LAURISILVA	28,148080	-17,236539
4	273866	3116608	LAURISILVA	28,155814	-17,302896
28	279806	3115599	LAURISILVA	28,147716	-17,242253
80	279876	3113579	LAURISILVA	28,129507	-17,241161
6	274826	3116611	LAURISILVA	28,156005	-17,293126
132	280852	3111623	LAURISILVA	28,112025	-17,230865
81	280328	3113633	LAURISILVA	28,130069	-17,236572
46	276316	3114677	LAURISILVA	28,138813	-17,277593
104	279332	3112631	FAYAL-BREZAL	28,120865	-17,246518
77	278292	3113596	FAYAL-BREZAL SUBARBOREO	28,129395	-17,257281
75	277333	3113631	FAYAL-BREZAL	28,129550	-17,267046
113	283830	3112635	FAYAL-BREZAL SUBARBOREO	28,121643	-17,200754
7	278818	3116604	FAYAL-BREZAL SUBARBOREO	28,156616	-17,252497
43	274843	3114604	FAYAL-BREZAL	28,137905	-17,292567
133	281330	3111584	FAYAL-BREZAL	28,111752	-17,225995
44	275329	3114611	FAYAL-BREZAL	28,138051	-17,287624
131	280360	3111607	FAYAL-BREZAL	28,111799	-17,235867
22	273850	3115621	FAYAL-BREZAL SUBARBOREO	28,146908	-17,302868
114	284329	3112634	FAYAL-BREZAL SUBARBOREO	28,121716	-17,195677

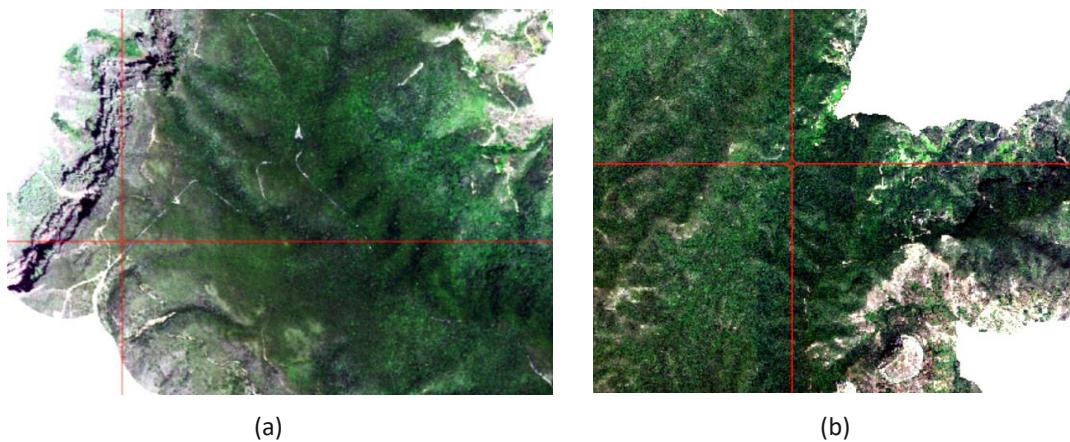


Figura 5.10. Clases vegetales sobre la imagen WorldView-2 de 2020: (a) Fayal-Brezal y (b) Laurisilva.

Adicionalmente, se estudió la separabilidad espectral entre las clases definidas por medio de la distancia de Jeffries-Matusita (Tabla 5.5). También se analizaron las diferencias de valores medios y desviación típica de las firmas espectrales de las clases (Figura 5.11) para valorar la viabilidad y fiabilidad de la clasificación propuesta. Los valores de separabilidad están por encima de 1.8, lo que nos permite tener una idea de que las clases seleccionadas son favorables para una correcta clasificación. Como era de esperar, la mayor complejidad para la discriminación de clases es entre las dos especies vegetales puesto que sus firmas espectrales tienen mayor similitud.

Tabla 5.5. Separabilidad de las clases.

SEPARABILIDAD DE CLASES	
FAYAL – BREZAL Y LAURISILVA	1.8448
SUELO Y FAYAL – BREZAL	1.9906
SUELO Y LAURISILVA	1.9997

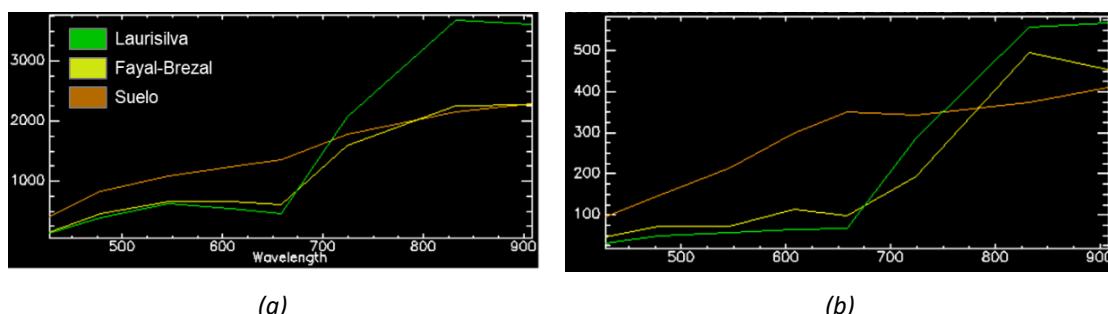


Figura 5.11. Firma espectral de cada clase: (a) media y (b) desviación estándar.

Luego de disponer de las ROIs para cada clase y el análisis de separabilidad, se procede a clasificar la imagen de WV-2 corregida empleando los clasificadores SVM y SAM. En los mapas

Capítulo 5. Clasificación de especies forestales en el Parque Nacional de Garajonay

obtenidos (Figura 5.12) se pueden distinguir las zonas de suelo o matorral (marrón) de las de vegetación forestal (verde), así como las zonas de vegetación donde abunda la laurisilva o el fayal-brezal. Los resultados obtenidos por ambos clasificadores son bastante similares, aunque SAM sobreestima ligeramente la abundancia de brezal. En cualquier caso, el análisis por parte de los responsables de conservación indica un grado aceptable de precisión.

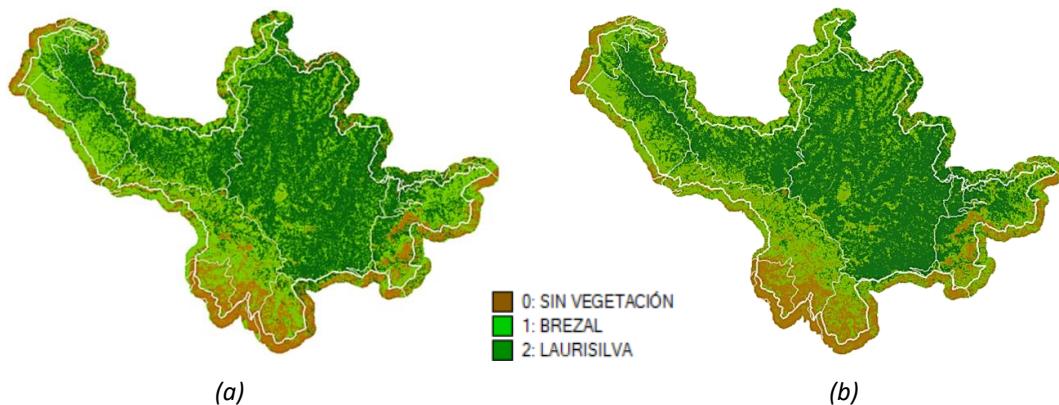


Figura 5.12. Mapas de especies del PNG obtenidos con los métodos de clasificación: (a) SVM y (b) SAM.

5.4. Análisis comparativo multisensor

En el presente apartado se aportan los mapas de especies finales generados a partir de datos LiDAR de GRAFCAN de 2017 y a partir de datos multiespectrales del satélite de muy alta resolución WorldView-2 de 2020.

Se procede a analizar visualmente la correlación existente entre los resultados obtenidos, a modo de validación entre las metodologías seguidas. En la Figura 5.13 se muestran los mapas de especies generados con cada metodología desarrollada, basada en alturas o en información espectral. Se detectan semejanzas en la distribución espacial de las especies en los diferentes mapas obtenidos, así como la densidad relativa de especies en diferentes regiones del Parque. Asimismo, hay que destacar que el mapa generado a partir de datos LiDAR permite apreciar con más detalle las diferentes especies. En general, la similitud entre los resultados obtenidos consolida positivamente las metodologías desarrolladas.

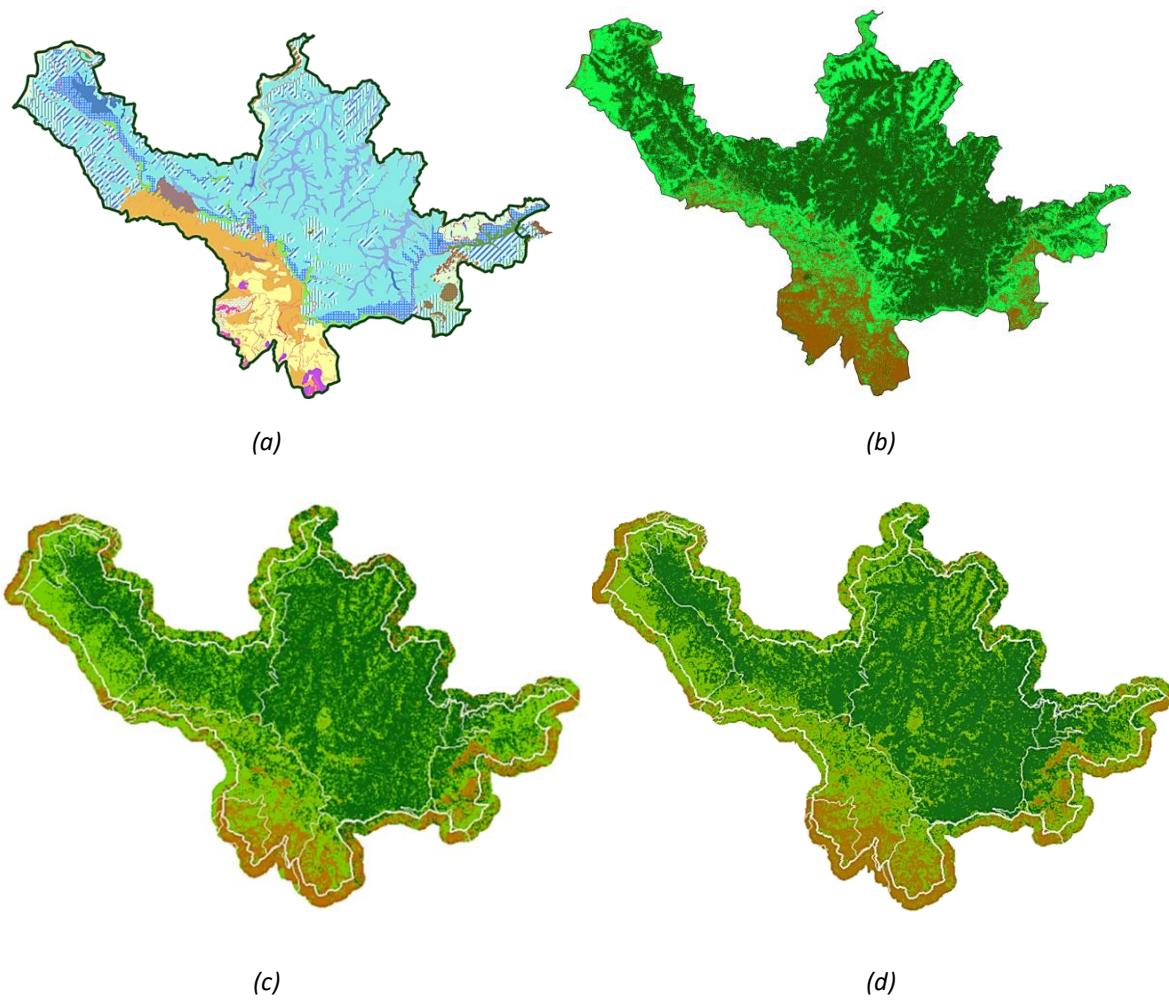


Figura 5.13. (a) Mapa de especies proporcionado por la dirección del PNG. Mapa de especies del PNG generado a partir de: (b) datos LiDAR, imágenes multiespectrales a través del método de clasificación: (c) SVM y (d) SAM.

Capítulo 6. Conclusiones

En este capítulo final, se analizan los resultados obtenidos y el grado de consecución de los objetivos propuestos. Además, se comentan las posibles líneas futuras de actuación como continuación del trabajo desarrollado en el presente TFG.

6.1. Revisión de los objetivos propuestos

Las tareas desempeñadas durante la realización del presente Trabajo de Fin de Grado han estado orientadas, fundamentalmente, al estudio del estado de salud vegetal y la variedad de las especies del Parque Nacional de Garajonay. Persiguiendo ese objetivo, se han empleado datos de teledetección de distinta naturaleza y se han analizado diferentes metodologías de procesado en busca de un procedimiento que permita la extracción óptima de características vegetales del Parque para permitir análisis precisos de vigorosidad y cobertura vegetal. Asimismo, se desarrollaron diferentes metodologías para la obtención de mapas de especies predominantes que puedan ser discriminadas con estas tecnologías. Es decir, bosques de laurisilvas con respecto a los de fayal-brezal.

Para el desarrollo de la resolución de los problemas propuestos, se han abordado satisfactoriamente una serie de objetivos y tareas, que se describen a continuación:

- Se han estudiado los sistemas de teledetección LiDAR y los sensores multiespectrales a bordo de plataformas satelitales, así como la naturaleza de los datos que a partir de éstos se generan.
- Se realizó un estudio de los proveedores de datos de teledetección disponibles en el mercado para la selección de los más adecuados para las características de este TFG.
- Se analizaron y evaluaron diferentes herramientas software para el procesado de las nubes de puntos LiDAR. Se seleccionó aquella aplicación que permitía la implementación de las metodologías de procesado propuestas y la correcta visualización y análisis de los datos y resultados.
- Se diseñaron e implementaron metodologías la corrección y preprocesado, tanto de las nubes de puntos LiDAR como de las imágenes multiespectrales.

- Se diseñaron e implementaron metodologías para la obtención de mapas de vigorosidad vegetal del Parque Nacional de Garajonay, usando nubes de puntos LiDAR y las imágenes multiespectrales de alta resolución.
- Se diseñaron e implementaron metodologías para la clasificación de especies más representativas del PNG a partir de nubes de puntos LiDAR e imágenes multiespectrales de alta resolución.

6.2. Conclusiones del análisis de resultados.

En este Trabajo de Fin de Grado se ha estudiado y analizado la viabilidad del empleo de técnicas de procesado sobre nubes de puntos LiDAR e imágenes multiespectrales de alta resolución para realizar estimaciones sobre el estado de salud vegetal y la clasificación de especies vegetales predominantes del Parque Nacional de Garajonay.

Para un análisis detallado, los resultados obtenidos se pueden agrupar en tres secciones: preprocesado, análisis de desvitalización y clasificación de especies, que se describen a continuación.

➤ Resultados del preprocesado

A partir de la aplicación de técnicas y metodologías de preprocesado y corrección, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- En función de la resolución espacial de los datos LiDAR, en ocasiones conviene no aplicar correcciones adicionales a las que el proveedor realiza porque puede dar lugar a la pérdida de información en algunas regiones.
- Mediante el modelado y procesado de datos LiDAR se pueden generar modelos digitales de precisión que son útiles para análisis del estado de la cubierta terrestre. De esta forma, se convirtieron las nubes de puntos LiDAR iniciales en fuentes de información útil.
- El empleo de datos satelitales multiespectrales exigió la realización de preprocesados complejos para corregir y minimizar las distorsiones existentes.
- El preprocesado y corrección de las imágenes satelitales posibilitó la obtención de información más precisa y confiable sobre las características del terreno y las coberturas vegetales.

➤ Resultados del análisis de desvitalización

A partir de la metodología desarrollada para analizar la cobertura vegetal y vigorosidad del Parque, se obtuvieron los siguientes resultados:

- La estimación de umbrales para la definición de clases empleadas en la clasificación demostró afectar directamente la precisión de los resultados obtenidos, resaltando la importancia de realizar un análisis estadístico detallado y preciso.
- El análisis estadístico de las parcelas globales permitió la identificación de los umbrales adecuados para estimaciones de vigorosidad vegetal. Esto posibilitó la obtención de un mapa de vigorosidad preciso a partir de los datos LiDAR, ratificando la importancia y utilidad de la altura del dosel en análisis forestales.
- El empleo del índice de vegetación WDRVI posibilitó la obtención de mapas de verdor vegetal, discriminando vegetación frondosa, vegetación poco vigorosa o desvitalizada, y suelo.
- La cartografía generada a partir de índices de vegetación de imágenes multiespectrales coincide bastante con la obtenida mediante el mapeo umbralizado del modelo digital del dosel obtenido a partir de datos LiDAR.
- Ha sido posible la detección de zonas de posible desvitalización o pérdida de vigor vegetal, obteniendo resultados adecuados en cuanto al análisis de la vitalidad de la cubierta vegetal del Garajonay.

➤ Resultados de la clasificación de especies

Sobre el proceso desarrollado para la clasificación de especies se pueden comentar las siguientes conclusiones:

- Debido a la similitud espectral y morfológica de las distintas especies que componen la laurisilva, no es posible con los datos de teledetección empleados en este TFG su correcta discriminación. Por este motivo, los mapas generados intentan únicamente discriminar laurisilvas de fayales-brezales, que sí mostraron diferencias considerables a partir de los análisis estadísticos y de separabilidad realizados.
- El mapeo especies vegetales generado a partir de datos LiDAR, definiendo varios umbrales según análisis estadísticos, permitió generar un modelo que discrimina las especies laurisilva respecto al fayal-brezal con distribuciones similares al mapa de especies clasificadas proporcionado por la dirección del PNG.
- Las técnicas empleadas tras el entrenamiento de los algoritmos para la definición de clases y clasificación de imágenes multiespectrales posibilitaron la obtención de mapas de clasificación de especies de laurisilva y fayal-brezal, con resultados similares a los proporcionados por el Parque.

- Se generaron los mapas capaces de clasificar las dos especies más representativas del Parque Nacional de Garajonay: las laurisilvas y los fayales-brezales.

➤ **Conclusión**

En general, se puede decir que uno de los obstáculos fundamentales encontrados durante el desarrollo del trabajo fue la escasez de datos de campo y la falta de precisión de éstos, debido a la complejidad del relieve del Parque, como se ha comentado con anterioridad. Esto dificulta el proceso de validación de las metodologías desarrolladas. Por otro lado, también destaca la falta de densidad de las nubes de puntos disponibles, puesto que no se trata de una exploración LiDAR llevada a cabo específicamente para el análisis de la vegetación del PN de Garajonay, sino que son de carácter general.

A pesar de esto, mediante el análisis y comparación de los resultados obtenidos a partir de datos de distinta naturaleza, se logró validar conjuntamente ambas metodologías producto de las similitudes en la distribución y patrones de comportamiento de los mapas generados. Es así que, mediante la realización de este TFG, se ratifica el potencial de los datos de teledetección para la realización de análisis forestales.

6.3. Líneas de trabajo futuras

Durante el desarrollo de este TFG se ha corroborado la potencialidad de los sistemas de teledetección para llevar a cabo estudios y análisis forestales, uniformizando el proceso de adquisición de los datos y posibilitando la obtención de información útil para la gestión forestal sobre toda la región que se desea estudiar.

Una vez valorado el trabajo realizado y los resultados obtenidos se detectan posibles líneas para trabajos futuros, tales como:

- Empleo de sensores LiDAR de alta resolución embarcados sobre drones, que posibilitarían un aumento exponencial en la densidad de la nube de puntos. A partir de estos datos sería posible el mapeo riguroso de vigorosidad y la clasificación más precisa de las especies.
- Profundizar en las herramientas de procesado y análisis estadístico de datos LiDAR disponibles en el software FUSION.
- Mejorar los métodos de clasificación de imágenes multiespectrales para aumentar la precisión, incluyendo información adicional de textura, pendientes del terreno, etc, o a partir de la aplicación de algoritmos más avanzados de clasificación.

- Emplear métodos de pansharpening sobre datos multiespectrales de WorldView-2 para mejorar la resolución espacial, dando lugar a una clasificación con mayor precisión.
- La recopilación de una base de datos de sobre firmas espectrales de las especies vegetales existentes en el Garajonay.

Parte II: Bibliografía

Bibliografía

En este apartado se enumeran todas las fuentes citadas y consultadas durante la elaboración de la memoria del presente TFG.

- [1] “50 aplicaciones de la Teledetección - MappingGIS.” <https://mappinggis.com/2018/10/50-aplicaciones-de-la-teledeteccion/> (accessed Jun. 12, 2023).
- [2] Emilio Chuvieco Salinero, *Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el espacio*. 2008.
- [3] F. J. Bohn and A. Huth, “The importance of forest structure to biodiversity–productivity relationships,” *R Soc Open Sci*, vol. 4, no. 1, Jan. 2016, doi: 10.1098/RSOS.160521.
- [4] Sabín Galán Pablo and J. Esteban Cava, “Técnicas de teledetección para el inventario forestal y sus aplicaciones a masas arbustiva,” pp. 29–29, 2017, Accessed: Jun. 12, 2023. [Online]. Available: http://enerbioscrub.ciemat.es/documents/210922/1369776/3_MESA1_PABLO_SABIN.pdf/65bd0446-07a5-4504-afd1-b8782714063d
- [5] K. D. Brosowske, R. E. Froese, M. J. Falkowski, and A. Banskota, “A review of methods for mapping and prediction of inventory attributes for operational forest management,” *Forest Science*, vol. 60, no. 4, pp. 733–756, Aug. 2014, doi: 10.5849/FORSCI.12-134.
- [6] “Red Canaria de Espacios Naturales Protegidos - CanariWiki.” https://www3.gobiernodecanarias.org/medusa/wiki/index.php?title=Red_Canaria_de_Espacios_Naturales_Protegidos (accessed Jun. 12, 2023).
- [7] Emilio Chuvieco, *Fundamentos de Teledetección Espacial*, Segunda Edición. 1990.
- [8] M. García, “Documento técnico: Obtención de variables forestales a partir de datos LiDAR”.
- [9] “¿Qué es un sistema LiDAR? - Geoinnova.” <https://geoinnova.org/blog-territorio/que-es-un-sistema-lidar/> (accessed Jun. 29, 2023).
- [10] A. Wehr and U. Lohr, “Airborne laser scanning—an introduction and overview,” *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, vol. 54, pp. 68–82, 1999, Accessed: Jun. 30, 2023. [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/Airborne-laser-scanning%E2%80%94an-introduction-and-Wehr-Lohr/831556f588a58e8403d9a45c1fc6fc9499fbe005>

- [11] “Los componentes del sistema móvil de LIDAR - ACI Corporation Esp.” <https://acicorporation.com/espanol/los-componentes-del-sistema-movil-de-lidar/> (accessed Jun. 30, 2023).
- [12] “Light Detection and Ranging (LiDAR) System Design.” <https://www.newport.com/n/lidar> (accessed Jun. 30, 2023).
- [13] “Aplicación de avances en LiDAR aerotransportado y modelos de crecimiento de vegetación en inspección y mantenimiento de líneas de transporte • SMARTGRIDSINFO.” <https://www.smartgridsinfo.es/comunicaciones/comunicacion-aplicacion-avances-lidar-aerotransportado-modelos-crecimiento-vegetacion-inspeccion-mantenimiento-lineas-transporte> (accessed Jun. 30, 2023).
- [14] “Formatos LAS y LAZ en LiDAR. Como usar LASzip para convertir uno en otro.” <https://geoinnova.org/blog-territorio/formatos-las-y-laz-en-lidar-y-como-usar-laszip/> (accessed Jun. 30, 2023).
- [15] “¿Qué son los datos LIDAR?—ArcMap | Documentación.” <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/manage-data/las-dataset/what-is-lidar-data.htm> (accessed Jun. 30, 2023).
- [16] “ArcGIS Help 10.1 - Trabajar con la clasificación de LAS en ArcGIS.” <https://resources.arcgis.com/es/help/main/10.1/index.html#/015w0000004700000> (accessed Jun. 30, 2023).
- [17] “Clasificación de puntos LIDAR—ArcMap | Documentación.” <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/manage-data/las-dataset/lidar-point-classification.htm> (accessed Jun. 30, 2023).
- [18] “Sporen van de oorlog en laser scanning – Archeologie van moderne conflicten.” <https://www.wo1.ugent.be/nl/voorbeelden/sporen-van-de-oorlog-vandaag-en-laser-scanning/> (accessed Jun. 30, 2023).
- [19] R. J. Mcgaughey, “FUSION/LDV: Software for LIDAR Data Analysis and Visualization,” 2022.
- [20] “Inicio - Plan Nacional de Ortofotografía Aérea.” <http://pnoa.ign.es/> (accessed Jun. 30, 2023).
- [21] “Presentación - Plan Nacional de Ortofotografía Aérea.” <http://pnoa.ign.es/web/portal/pnoa-lidar/presentacion> (accessed Jun. 30, 2023).
- [22] “Lidar | GRAFCAN - Mapas de Canarias.” <https://www.grafcan.es/productos/lidar> (accessed Jun. 30, 2023).
- [23] “USGS Lidar Explorer Map.” <https://apps.nationalmap.gov/lidar-explorer/#/about> (accessed Jun. 30, 2023).
- [24] “Home Page - GEDI.” <https://gedi.umd.edu/> (accessed Jul. 01, 2023).
- [25] “Servicio de Venta y Descarga de Información Geográfica y Territorial de Canarias.” <https://tiendavirtual.grafcan.es/visor.jsf?currentSeriePk=340230144> (accessed Jul. 01, 2023).
- [26] “Web GIS Mapping Software | ArcGIS Online.” <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-online/overview> (accessed Jul. 01, 2023).

Bibliografía

- [27] “Bienvenido al proyecto QGIS!” <https://qgis.org/es/site/index.html> (accessed Jul. 01, 2023).
- [28] “¿Qué es el QGIS y para qué sirve? - okupo.mx.” <https://okupo.mx/que-es-el-qgis-y-para-que-sirve/> (accessed Jul. 01, 2023).
- [29] “Vegetation Monitoring and Remote Sensing team (VMaRS).” <http://forsys.sefs.uw.edu/index.html> (accessed Jul. 01, 2023).
- [30] “Global Mapper - Blue Marble Geographics.” <https://www.bluemarblegeo.com/global-mapper/> (accessed Jul. 01, 2023).
- [31] “Descarga gratuita de IDL/ENVI/LiDAR - Entrar en PC.” https://agetintopc.com/es/idl-envi-lidar-free-download/#idl/_envi/_lidar_free_download (accessed Jul. 01, 2023).
- [32] “Product Overview – rapidlasso GmbH.” <https://rapidlasso.de/product-overview/> (accessed Jul. 01, 2023).
- [33] “LiDAR360-GreenValley International.” <https://greenvalleyintl.com/LiDAR360/> (accessed Jul. 01, 2023).
- [34] “ESA - Eduspace EN - Home - Spectral signatures.” https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_EN/SEMPNQ3Z2OF_0.html (accessed Jun. 13, 2023).
- [35] “Spectral Signature Concepts Typical Spectral Reflectance Characteristics Of Water, Vegetation And Soil.” https://www.brainkart.com/article/Spectral-Signature-Concepts-Typical-Spectral-Reflectance-Characteristics-Of-Water,-Vegetation-And-Soil_4470/ (accessed Jun. 13, 2023).
- [36] R. Njambi, “Full spectrum: Multispectral imagery and hyperspectral imagery,” Dec. 2022, Accessed: Jun. 19, 2023. [Online]. Available: <https://up42.com/blog/full-spectrum-multispectral-imagery-and-hyperspectral-imagery#:~:text=Multispectral%20imagery%20is%20imaging%20containing%20multiple%20spectral%20bands,to%20the%20infrared%20portions%20of%20the%20electromagnetic%20spectrum>.
- [37] D. Municio Durán, “Técnicas de oversampling aplicadas al análisis de imágenes hiperespectrales.” Accessed: Jun. 20, 2023. [Online]. Available: https://dehesa.unex.es/bitstream/10662/8811/1/TFGUEX_2019_Municipio_Duran.pdf
- [38] “WorldView-2 - Earth Online.” <https://earth.esa.int/eogateway/missions/worldview-2> (accessed Jun. 14, 2023).
- [39] MAXAR, “WORLDVIEW-2.” Accessed: Jun. 19, 2023. [Online]. Available: https://www.geoimage.com.au/wp-content/uploads/2021/06/Maxar_WV2-Data-Sheet.pdf
- [40] “The Benefits of the Eight Spectral Bands of WorldView-2,” 2010, Accessed: Jun. 18, 2023. [Online]. Available: https://dg-cms-uploads-production.s3.amazonaws.com/uploads/document/file/35/DG-8SPECTRAL-WP_0.pdf

- [41] C. Padwick, M. Deskevich, S. Software, F. Pacifici, S. Smallwood, and S. Software Engineer, "WORLDVIEW-2 PAN-SHARPENING," San Diego, California, 2010. Accessed: Jun. 19, 2023. [Online]. Available: <https://www.asprs.org/wp-content/uploads/2013/08/Padwick.pdf>
- [42] GEOESPACE SOLUTIONS INNOVACIÓN & COMPROMISO and L3HARRIS, "ENVI ANALYTICS 'Soluciones reales con datos confiables.'" Accessed: Jun. 19, 2023. [Online]. Available: <https://www.geospace-solutions.com/catalogo-envi>
- [43] "Getting Started with Hyperspectral Image Processing - MATLAB & Simulink - MathWorks España." <https://es.mathworks.com/help/images/getting-started-with-hyperspectral-image-analysis.html> (accessed Jun. 19, 2023).
- [44] C. L. Wyatt, *Radiometric calibration : theory and methods*. Academic Press, 1978. Accessed: Jun. 20, 2023. [Online]. Available: https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=MDvdvecbTLoC&oi=fnd&pg=PP1&dq=rad iometric+calibration+what+is&ots=uoConyEViN&sig=HhP87drvzLKobQ4LAhNmmfH8HJI &redir_esc=y#v=onepage&q=radiometric%20calibration%20what%20is&f=false
- [45] T. Updike and C. Comp, "Radiometric Use of WorldView-2 Imagery Technical Note," Colorado, Nov. 2010. Accessed: Jun. 20, 2023. [Online]. Available: https://wp-cdn.apollomapping.com/web_assets/user_uploads/2011/09/14130442/Radiometric_U se_of_WorldView-2_Imagery.pdf
- [46] Y. Guo, J. Senthilnath, W. Wu, X. Zhang, Z. Zeng, and H. Huang, "Radiometric calibration for multispectral camera of different imaging conditions mounted on a UAV platform," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 11, no. 4, Feb. 2019, doi: 10.3390/su11040978.
- [47] L. Katkovsky, "Atmospheric correction of multispectral satellite imagery," *Ukrainian journal of remote sensing*, no. 25, pp. 4–11, Jun. 2020, doi: 10.36023/ujrs.2020.25.170.
- [48] A. J. Edwards, "Geometric Correction of Satellite and Airborne Imagery," in *Remote Sensing Handbook for Tropical Coastal Management*, Paris: UNESCO, 2000, pp. 93–108. Accessed: Jun. 23, 2023. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/261795733_Geometric_correction_of_satellite_and_airborne_imagery
- [49] J. Xue and B. Su, "Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications," 2017, doi: 10.1155/2017/1353691.
- [50] R. B. Myneni, F. G. Hall, P. J. Sellers, and A. L. Marshak, "The interpretation of spectral vegetation indexes," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 33, no. 2, pp. 481–486, Jun. 2019, doi: 10.1109/TGRS.1995.8746029.
- [51] "Vista de Caracterización Espectral y Detección de Flecha Seca en Palma Africana en Puntarenas, Costa Rica | Revista Geográfica de América Central." <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/geografica/article/view/10700/13289> (accessed Jul. 02, 2023).
- [52] S. Huang, L. Tang, J. P. Hupy, Y. Wang, and G. Shao, "A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing," *J. For. Res*, vol. 32, no. 1, pp. 1–6, 2021, doi: 10.1007/s11676-020-01155-1.

Bibliografía

- [53] “NDVI: Índice De Vegetación de Diferencia Normalizada.” <https://eos.com/es/make-an-analysis/ndvi/> (accessed Jun. 25, 2023).
- [54] O. Mutanga, A. Masenya, and M. Sibanda, “Spectral saturation in the remote sensing of high-density vegetation traits: A systematic review of progress, challenges, and prospects,” *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 198, pp. 297–309, 2023, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2023.03.010.
- [55] “Landsat Enhanced Vegetation Index | U.S. Geological Survey.” <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-enhanced-vegetation-index> (accessed Jun. 25, 2023).
- [56] A. A. Gitelson, “Wide Dynamic Range Vegetation Index for Remote Quantification of Biophysical Characteristics of Vegetation,” *J Plant Physiol*, vol. 161, no. 2, pp. 165–173, Jan. 2004, doi: 10.1078/0176-1617-01176.
- [57] “Image Classification and Analysis.” <https://natural-resources.canada.ca/maps-tools-and-publications/satellite-imagery-and-air-photos/tutorial-fundamentals-remote-sensing/image-interpretation-analysis/image-classification-and-analysis/9361> (accessed Jun. 25, 2023).
- [58] “Supervised Image Classification Techniques.” <https://www.ukessays.com/essays/engineering/supervised-image-classification-9746.php> (accessed Jun. 25, 2023).
- [59] N. Fernández and G. Piñeiro, “La caracterización de la heterogeneidad espacial de los ecosistemas: el uso de atributos funcionales derivados de datos espectrales,” *REVISTA CIENTÍFICA Y TÉCNICA DE ECOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE*, Sep. 2008, [Online]. Available: <http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=572>
- [60] D. Rocchini *et al.*, “The Spectral Species Concept in Living Color,” *J Geophys Res Biogeosci*, vol. 127, no. 9, p. e2022JG007026, Sep. 2022, doi: 10.1029/2022JG007026.
- [61] “7.4 Multi-spectral Image Processing | GEOG 160: Mapping our Changing World.” <https://www.e-education.psu.edu/geog160/node/1961> (accessed Jun. 25, 2023).
- [62] “Supervised and Unsupervised Classification in Remote Sensing - GIS Geography.” <https://gisgeography.com/supervised-unsupervised-classification-arcgis/> (accessed Jun. 25, 2023).
- [63] “Técnicas de Clasificación de Imágenes en la Teledetección – EcoScript.” <https://ecoscript.org/tecnicasclasificacionimagenes/> (accessed Jun. 25, 2023).
- [64] Y. Poveda-Sotelo, M. A. Bermúdez-Cella, and P. Gil-Leguizamón, “Evaluación de métodos de clasificación supervisada para la estimación de cambios espacio-temporales de cobertura en los páramos de Merchán y Telecom, Cordillera Oriental de Colombia,” vol. 44, doi: 10.18273/revbol.v44n2-2022002.
- [65] “Spectral Angle Mapper.” <https://www.l3harrisgeospatial.com/docs/spectralanglemapper.html> (accessed Jun. 25, 2023).
- [66] S. Le Moan, A. Mansouri, J. Y. Hardeberg, and Y. Voisin, “A class-separability-based method for multi/hyperspectral image color visualization,” *Proceedings - International*

- Conference on Image Processing, ICIP*, pp. 1321–1324, 2010, doi: 10.1109/ICIP.2010.5652959.
- [67] R. Sen, S. Goswami, A. K. Choudhury, and B. Chakraborty, “Jeffries-Matusita distance as a tool for feature selection”, Accessed: Jun. 25, 2023. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8971800>
- [68] S. Padma and S. Sanjeevi, “Jeffries Matusita based mixed-measure for improved spectral matching in hyperspectral image analysis,” *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 32, pp. 138–151, 2014, doi: 10.1016/j.jag.2014.04.001.
- [69] “Parques Nacionales. Centro Nacional de Información Geográfica.” <https://parquesnacionales.cnig.es/garajonay> (accessed Jul. 02, 2023).
- [70] “IDECanarias visor 4.5.1.” <https://visor.grafcan.es/visorweb/> (accessed Jul. 02, 2023).
- [71] L. A. Percepción *et al.*, “Co-Adaptación 2021: conocimiento colaborativo para acelerar la adaptación al cambio climático”.
- [72] “Parque Nacional de Garajonay.” <https://www.miteco.gob.es/es/parques-nacionales-oapn/red-parques-nacionales/parques-nacionales/garajonay/> (accessed Jul. 02, 2023).
- [73] Á. B. Fernández, L. A. Gómez González, and M. Gómez, “Garajonay después del gran incendio de 2012.”
- [74] “Catálogo de Metadatos. IDECanarias - Catálogo de Metadatos. IDECanarias.” https://catalogo.idecanarias.es/geonetwork/srv/spa/catalog.search#/metadata/spagrafcان_204LIDAR2014_20160101 (accessed Jul. 02, 2023).
- [75] “La desviación estándar: Cálculo e interpretación para invertir.” <https://www.inbestme.com/blog/desviacion-estandar-volatilidad-riesgo/> (accessed Jul. 02, 2023).
- [76] “RadiometricCalibration Task.” <https://www.l3harrisgeospatial.com/docs/enviradiometriccalibrationtask.html> (accessed Jun. 26, 2023).
- [77] “Perform Atmospheric Correction.” <https://www.l3harrisgeospatial.com/docs/TDPerformAtmosphericCorrection.html> (accessed Jun. 26, 2023).
- [78] “Atmospheric Corrections with FLAASH.” <https://www.l3harrisgeospatial.com/docs/flaash.html#Select2> (accessed Jun. 26, 2023).
- [79] T. Cooley *et al.*, “FLAASH, a MODTRAN4-based atmospheric correction algorithm, its applications and validation,” *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, vol. 3, pp. 1414–1418, 2002, doi: 10.1109/IGARSS.2002.1026134.
- [80] “RPC Orthorectification.” <https://www.l3harrisgeospatial.com/docs/RPCOrthorectification.html> (accessed Jun. 26, 2023).
- [81] “Vegetation Indices.” <https://www.l3harrisgeospatial.com/docs/VegetationIndices.html> (accessed Jun. 29, 2023).

Bibliografía

- [82] “Build a New Decision Tree.” <https://www.l3harrisgeospatial.com/docs/buildingnewdecisiontree.html> (accessed Jul. 04, 2023).
- [83] “Decision Tree.” <https://www.l3harrisgeospatial.com/docs/DecisionTree.html> (accessed Jul. 02, 2023).

Parte III: Presupuesto

Presupuesto

Este apartado está dedicado a la realización de un análisis de viabilidad económica del Trabajo de Fin de Grado. Se detallan los costos asociados a la realización del trabajo.

Se divide el presupuesto en distintas secciones que separan los distintos costes asociados al desarrollo de este TFG. Los costes (P) se dividen en:

1. Recursos Hardware.
2. Recursos Software.
3. Datos LiDAR.
4. Imagen Satelital.
5. Recursos Humanos.
6. Amortización.
7. Redacción del documento.
8. Material Fungible.
9. Impuestos.

P1. Recursos Hardware

El equipamiento hardware que se ha empleado durante el desarrollo del presente proyecto es un ordenador portátil Lenovo ThinkBook 15 G2 ITL con las siguientes características:

- 11th Gen Intel(R) Core (TM) i5-1135G7 @ 2.40GHz 2.42 GHz
- Memoria RAM 16,0 GB.
- 500 GB de disco duro SSD.

Tabla P.1. Coste de recursos Hardware.

Recursos Hardware	Coste
Ordenador Lenovo ThinkBook 15 G2 ITL	948.86 €

P2. Recursos Software

Las herramientas software empleadas en el presente proyecto son:

- Programa FUSION
- Programa QGIS
- Programa ENVI 5.4
- Microsoft Office 16.
- Microsoft PowerPoint 16.

Tabla P.2. Coste de recursos Software.

Recursos Software	Coste
FUSION	0 €
QGIS	0 €
Office 16	0 €
ENVI 5.4	4200 €

P3. Datos LiDAR

Para la realización de este TFG se han empleado varias parcelas de bajo coste de nubes de puntos LiDAR proporcionados por GRAFCAN. Las parcelas se obtienen a través de la tienda virtual de GRAFCAN. Con un coste de 4,00 € cada parcela, fue necesario adquirir un total de 66 parcelas, para un coste total de 264,00 €.

Tabla P.3. Coste de datos LiDAR.

Datos LiDAR	Coste
GRAFCAN (66 parcelas)	264,00 €

P.4. Imagen Satelital

Para la realización de este TFG se ha empleado una imagen multiespectral del satélite de alta resolución WorldView-2. Las parcelas se obtienen a través de la tienda virtual de GRAFCAN. Con un coste de 4,00 € cada parcela, fue necesario adquirir un total de 66 parcelas, para un coste total de 264,00 €.

Tabla P.4. Coste de imagen satelital.

Datos LiDAR	Coste
WorldView-2	374,40 €

P5. Recursos Humanos

El salario a percibir por el autor de este TFG se estima en función de la tabla de retribuciones PDI del año 2021. Teniendo en cuenta que el autor se categoriza como Investigador Meces 3 a tiempo parcial y la duración estimada de realización del TFG, en la tabla P.5 se describe la cantidad monetaria a percibir por el autor.

Tabla P.5. Coste de recursos Humanos.

Categoría	Sueldo Mensual	Sueldo por hora	Horas de TFG	Sueldo Final
Investigador Meces 3	1317,49 €	7,48 €	300	2244,32 €

P6. Amortización

La amortización se estima a partir de la expresión de amortización lineal, que corresponderá al coste final de los recursos materiales empleados:

$$C_f = \frac{V_a - V_r}{A_u} \quad (III. 1)$$

En dicha expresión, V_a es el valor inicial del producto, V_r es el valor residual del producto y A_u es el tiempo de uso. En las tablas P.5 y P.6 se muestran los valores de amortización obtenidos:

Tabla P.5. Amortización de recursos Hardware.

Recursos Hardware	Valor de adquisición	Vida útil	Coste amortizado
Ordenador Lenovo ThinkBook 15 G2 ITL	948,86 €	5 años	189,78 €
Total			189,78 €

Tabla P.6. Amortización de recursos Software.

Recursos Software	Valor de adquisición	Vida útil	Coste amortizado
ENVI 5.4	4200 €	3 años	1400 €
GRAFCAN (66 parcelas)	264,00 €	3 años	264,00 €
WorldView-2	374,40 €	3 años	374,40 €
Total			1612,80 €

P7. Redacción del documento

El coste de redacción del proyecto se estima según la siguiente expresión:

$$R = 0.07 * P * C_n \quad (III. 2)$$

En dicha expresión, C_n es la función de ponderación del presupuesto. Para este caso, se fija a 1, dado que el coste del proyecto no asciende los 30050 €. En la tabla P.7 se muestran los costes estimados hasta el momento (P).

Tabla P.7. Coste total del proyecto.

Concepto	Costes
Recursos Hardware	948,86 €
Recursos Software	4838,40 €
Recursos Humanos	2244,32 €
Total	8031,58 €

Se estima entonces el coste de redacción:

$$R = 0.07 * 8031,58 * 1 = 562,21 \text{ €}$$

P8. Material Fungible

Además de los recursos hardware y software, no se han empleado otros recursos adicionales.

P9. Impuestos

Anteriormente se estimó el coste total del proyecto antes de impuestos. Teniendo en cuenta el Impuesto General Indirecto Canario (IGIC), que es de un 7%, se recalcula el coste total del TFG, como se muestra en la tabla P.8:

Tabla P.8. Coste total del proyecto, impuestos incluidos.

Concepto	Costes
Recursos Hardware	948.86 €
Recursos Software	4838,4 €
Recursos Humanos	2244,32 €
Redacción del documento	562,21 €
Material Fungible	0 €
Subtotal	8593,79 €
Impuesto IGIC (7%)	601,57 €
Total	9195,36 €

Presupuesto

El presupuesto necesario para el desarrollo de este Trabajo de Fin de Grado titulado *Fusión de imágenes multiespectrales y datos LiDAR para el análisis forestal* asciende a los **9195,36 €**.

Fdo: Guillermo Cárdenes Díaz

11 de julio de 2023

Las Palmas de Gran Canaria

Parte IV: Anexos

Anexos

En esta sección se aportarán los comandos empleados en la metodología de procesado final de datos LiDAR mediante el uso del software FUSION.

A.1. Introducción

Las herramientas de FUSION son programas de línea de comando específicos de cada tarea, disponibles en versión por defecto y en versión de 64 bits. Estos programas están diseñados para ejecutarse desde una línea de comandos (CMD) o utilizando programas por lotes. Los programas suelen tener parámetros obligatorios y opcionales, así como conmutadores para controlar las opciones del programa. Los conmutadores deben ir precedidos por una barra inclinada "/". Si un conmutador tiene varios parámetros después de los dos puntos ":", deben estar separados por una sola coma "," sin espacios antes o después de la coma. Es importante resaltar que para ejecutar correctamente estas herramientas se debe incluir el directorio completo de los archivos y herramientas de entrada y salida, o, por su parte, ser ejecutados desde su directorio de ubicación.

Para la realización del presente Trabajo de Fin de Grado se ha partido de la base de ejecutar todos los programas desde el directorio donde se encuentran tanto los programas, como los archivos de entradas de éstos y los archivos de salida que se generan. Asimismo, se ha utilizado la versión de 64 bits de todos los programas.

A.2. Preprocesado de datos LiDAR

A.2.1. Unión de nubes de puntos

La unión de todas las parcelas de nubes de puntos descomprimidas que contienen información sobre región del Parque Nacional de Garajonay se realiza a través de la herramienta *MergeData*. Existen dos opciones para ello, se puede introducir manualmente el nombre de todos los archivos de nubes de puntos separados por espacio o introducir dichos nombres en un archivo de texto (.txt) y solamente introducir en la línea de comando el nombre del archivo de texto

donde se enlistan todas las parcelas que se desean unir. En este TFG se optó por automatizar más el proceso mediante la segunda de las variantes. La línea de comandos resultante es:

```
MergeData64 Parcelas_PNG.txt PNG_2017_merged.las
```

El archivo de salida “PNG_2017_merged.las” incluye ya información LiDAR de todas las parcelas incluidas en el listado.

A.2.2. Generación del modelo digital del terreno (MDT) empleando la clasificación de suelo de GRAFCAN

Esta operación se realiza por medio de la herramienta *GridSurfaceCreate* a través del comando:

```
gridsurfacecreate64 /class: 2 /spike: 50  
PNG_2017_merged_ground.dtm 1 m m 1 0 0 0 PNG_2017_merged.las
```

El archivo de salida “PNG_2017_merged_ground.dtm” es un modelo ráster de la superficie del terreno.

A.2.3. Generación del modelo digital de superficie (MDs)

Esta operación se realiza por medio de la herramienta *CanopyModel* a través del comando:

```
canopymodel64 PNG_2017_merged_canopy.dtm 1 m m 1 0 0 0 PNG_2017_merged.las
```

El archivo de salida “PNG_2017_merged_canopy.dtm” es un modelo ráster de altitud absoluta de la superficie.

A.2.3. Generación del modelo digital del dosel (CHM)

Esta operación se realiza por medio de la herramienta *CanopyModel* empleando el conmutador “/ground”, a través del comando:

```
canopymodel64 /ground: PNG_2017_merged_ground.dtm  
PNG_2017_merged_chm.dtm 1 m m 1 0 0 0 PNG_2017_merged.las
```

El archivo de salida “PNG_2017_merged_chm.dtm” es un modelo ráster de altura real de la vegetación.

A.3. Validación de datos LiDAR

A.3.1. Recorte de región de interés de la nube de puntos

Esta operación se realiza a través de la función *ClipData*, empleando los conmutadores “/shape”, “/dtm”, “/height” y “/zmin”, teniendo como referencia las coordenadas y la forma de la región de interés, mediante el comando:

```
ClipData64 /shape: 0 /dtm: PNG_2017_merged_ground.dtm /height /zmin: 0  
PNG_2017_merged.las PNG_2017_merged_LAMAQUE.las  
280727 3114838 280787 3114878
```

El archivo de salida “PNG_2017_LAMAQUE.las” incluye la información LiDAR normalizada respecto a la superficie del terreno (altura real) de los árboles de la superficie correspondiente a Lamaqué.

A.3.2. Generación de estadísticas de la nube de puntos de vegetación de Lamaqué

Las estadísticas se generan a través de la herramienta *CloudMetrics*, haciendo uso de los conmutadores “/new”, “/id”, “/outlier” y “/above”, a través del comando:

```
CloudMetrics64 /new /id /outlier: 1.5,30  
/above: 1.5 PNG_2017_merged_LAMAQUE.las LAMAQUE_metrics_1_5.csv
```

El archivo de salida “LAMAQUE_metrics.csv” puede leerse fácilmente con programas como MS - Excel.

A.3. Conversión de formato DTM a ASCII

Esta operación se realiza a través de la función *ASCIIDTM*, empleando el conmutador “/raster”, mediante los comandos:

1. *DTM2ASCII64 /raster PNG_2017_merged_ground.dtm*
2. *DTM2ASCII64 /raster PNG_2017_merged_chm.dtm*

Se generan los archivos ráster de salida en formato ASCII “PNG_2017_merged_ground.asc” y “PNG_2017_merged_chm.asc” para poder ser visualizados y analizados en otros software.