

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**CARACTERIZACIÓN TOPOGRÁFICA Y ESTIMACIÓN DE LA BIOMASA,
CARBONO Y DIÓXIDO DE CARBONO EQUIVALENTE, MEDIANTE EL USO DE
SENSORES REMOTOS, EN LA LAGUNA PALO VERDE, PARQUE NACIONAL
PALO VERDE, GUANACASTE, COSTA RICA.**

Trabajo final de investigación aplicada sometido a la consideración de la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Geografía para optar al grado y título de Maestría Profesional en Sistemas de Información Geográfica y Teledetección.

ANA JULIETA CALVO OBANDO
ADRIANA IBARRA VARGAS

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

2021

Dedicatoria

A mi familia, amigos y compañeros por todo su apoyo incondicional.

Ana Julieta

A Dios por ser mi guía,
a mi esposo Jonathan Segura, siempre has estado brindándome tu comprensión cariño
y amor... A mis amados hijos Vielka y Felipe por ser mi fuente de motivación e
inspiración para poder superarme cada día más y así luchar para que la vida nos
depare un futuro mejor... A mi madre y hermanos por sus palabras de aliento para que
siguiera adelante con mis ideales... A mis compañeros y amigos presentes y pasados,
quienes sin esperar nada a cambio compartieron su conocimiento, alegrías y
tristezas... A todas aquellas personas que durante estos tres años estuvieron a mi lado
apoyándome y lograron que este sueño se haga realidad.

Adriana

Agradecimientos

Se reconoce el apoyo logístico y financiero de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica, ya que este trabajo fue posible gracias al proyecto de investigación “*GWSat Prototipo de monitoreo de humedales a través de un sistema espacial tipo –Store and Forward–*”.

Al profesor tutor Dr. Julio Calvo Alvarado por el apoyo brindado durante el desarrollo de la investigación.

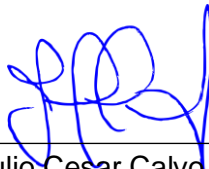
A la M.Sc. Andrea Tapia Arenas y el Máster. Vladimir Jiménez-Salazar, por su colaboración al revisar la presente investigación.

Se agradece el apoyo logístico de la Organización de Estudios Tropicales (OET), Estación Biológica Palo Verde.

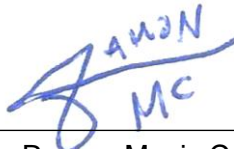
“Este trabajo final de investigación aplicada fue aceptado por la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Geografía de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar al grado y título de Maestría Profesional en Sistemas de Información Geográfica y Teledetección



M.Sc. Melvin Lizano Araya
Representante del Decano Sistema de Estudios de Posgrado



Ph.D. Julio Cesar Calvo Alvarado
Profesor Guía



M.Sc. Ramon Masis Campos
Representante del Director del Programa de Posgrado



Máster. Vladimir Jiménez-Salazar
Lector



M.Sc. Andrea Tapia Arenas
Lectora



Ana Julieta Calvo-Obando
Estudiante



Adriana Ibarra Vargas
Estudiante

Índice general

<i>Dedicatoria</i>	ii
<i>Agradecimientos</i>	iii
<i>Hoja de aprobación</i>	iv
<i>Índice general</i>	v
<i>Resumen</i>	vii
<i>Abstract</i>	viii
<i>Lista de tablas</i>	ix
<i>Lista de figuras</i>	x
<i>Lista de anexos</i>	xiii
<i>Lista de abreviaturas</i>	xiv
CAPITULO I: INTRODUCCIÓN	1
i. Introducción al tema	1
ii. Justificación del tema	3
iii. Objetivos	6
Objetivo general:	6
Objetivos específicos:	7
iv. Delimitaciones	7
v. Alcances del proyecto.....	7
vi. Limitaciones	8
CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO	10
2.1 Área de estudio	10
2.1.1 Antecedentes históricos	12
2.1.2 Aspectos biofísicos.....	14
2.2 Humedales	15
2.3 Modelos de Elevación Digital (MED)	18
2.3.1 Métodos de Elaboración del MED	19
2.3.2 Algoritmos de interpolación para generar un MED	21
2.3.3 Validación de un MED.....	23

CAPITULO 3: METODOLOGÍA.....	25
3.1 Tipo de investigación	25
3.2 Instrumentos e Insumos.....	25
3.3 Procedimientos y análisis de la información recolectada.....	33
3.3.1 Caracterizar topográficamente el humedal de la Laguna Palo Verde del Parque Nacional Palo Verde mediante técnicas convencionales y/o de aplicación de datos de sensores remotos y software de acceso libre.	34
3.3.2. Clasificar la cobertura de la tierra específicamente en la Laguna Palo Verde del Parque Nacional Palo Verde mediante técnicas convencionales y/o de aplicación de datos de sensores remotos y software de acceso libre.	55
3.3.3 Estimar la biomasa, carbono y dióxido de carbono equivalente por encima del espejo de agua almacenados en la Laguna Palo Verde del Parque Nacional Palo Verde mediante técnicas de aplicación de datos de sensores remotos y software de acceso libre.....	69
CAPITULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	72
4.1 Caracterizar topográficamente la Laguna Palo Verde del Parque Nacional Palo Verde mediante técnicas convencionales y/o de aplicación de datos de sensores remotos y software de acceso libre.	72
4.1.1 Modelo de Terreno (MDT).....	72
4.1.2 Modelo de Terreno (MDT) con curvas de Nivel.....	73
4.1.3 Establecimiento Hitos.....	73
4.1.4 Histograma	74
4.1.5 Validación Modelo de Elevación	75
4.2 Clasificar la cobertura de la tierra específicamente en la Laguna Palo Verde del Parque Nacional Palo Verde mediante técnicas convencionales y/o de aplicación de datos de sensores remotos y software de acceso libre.	78
4.3 Estimar la biomasa, carbono y dióxido de carbono equivalente por encima del espejo de agua almacenados en la Laguna Palo Verde del Parque Nacional Palo Verde mediante técnicas de aplicación de datos de sensores remotos y software de acceso libre.	83
CAPITULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	85
BIBLIOGRAFÍA	89
ANEXOS	95

Resumen

La investigación se situó en el Parque Nacional Palo Verde (PNPV), específicamente en el humedal de la Laguna Palo Verde (10° 20' 2.50" N, 85° 20' 45.84" W), el cual tiene un área aproximada de 1289 hectáreas y se localiza en la cuenca baja del Río Tempisque. Administrativamente, el sitio se ubica en el distrito y cantón de Bagaces, provincia Guanacaste, dentro del Área de Conservación Arenal Tempisque (ACAT) del Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC), Costa Rica. Corresponde a uno de los 12 humedales RAMSAR que se ubican en el país. Su importancia ecológica se centra en la reproducción y alimentación de especies en peligro de extinción, aves acuáticas, migratorias y residentes, constituyéndose en una de las zonas de anidamiento más grandes del país. La presencia de plantas invasoras como *Typha dominguensis* (tifa), durante la época seca del año, pone en riesgo la dinámica de los espejos de agua de este humedal y por tanto de los patrones de reproducción, alimentación y anidamiento de las aves. El objetivo de este estudio fue caracterizar el sitio topográficamente y ecológicamente en términos de almacenamiento de carbono, mediante técnicas metodológicas de aplicación de sensores remotos fácilmente replicables en todo el territorio de Costa Rica, maximizando el uso de software de acceso libre así como de recursos de información disponibles de forma gratuita; y que contribuya al manejo de la tifa como planta invasora en el sitio, así como a la valoración del servicio ecosistémico de captura y almacenamiento de carbono. Esto fue posible gracias a la información obtenida de escenas del sensor Sentinel-2 de la constelación de satélites Copernicus de la Agencia Espacial Europea, así como de datos del sensor LVIS (Land, Vegetation, and Ice Sensor) de la NASA el cual consiste en un sistema de altímetro láser empleado para recopilar datos sobre la topografía de la superficie y su estructura 3D. La investigación fue capaz de construir un Modelo de Elevación del Terreno del humedal, con verificación topográfica de campo, obteniéndose un rango en las cotas de elevación entre los 8,11 – 20,10 metros. Por otra parte, fue posible realizar una clasificación supervisada con áreas de entrenamiento basadas en los valores de NDVI de escenas para la temporada seca y lluviosa, siendo que para la época seca (marzo 2020) se obtuvo valores en un rango de -0,10 – 0,83; mientras que para época lluviosa (octubre 2020) entre -0,51 – 0,89. Además, fue posible obtener un resultado exploratorio del comportamiento en el almacenamiento de biomasa, carbono y CO₂ equivalente almacenado en la tifa, por lo que fue posible determinar cómo el CO₂ equivalente fue mayor del doble durante la época seca que durante la época lluviosa, pasando de 4,6 ton/ha en marzo a 2,0 ton/ha en octubre; posiblemente dada la capacidad de la especie de proliferar de forma invasiva en ambientes con déficit hídrico. Con este trabajo se espera contribuir al estado del conocimiento sobre este humedal y que la información generada aporte en la toma de decisiones para asegurar su conservación y manejo.

Palabras clave: Humedales, Sentinel-2, Clasificación supervisada, Software libre, Servicios ecosistémicos, *Typha dominguensis*, LVIS, Modelos de Elevación de Terreno.

Abstract

Topographic characterization and estimation of biomass, carbon and equivalent carbon dioxide, by using remote sensors, in Palo Verde Lagoon Wetland, Palo Verde National Park, Guanacaste, Costa Rica.

This study was situated in the National Park Palo Verde (PNPV), specifically in Palo Verde Lagoon Wetland (10 ° 20 '2.50' 'N, 85 ° 20' 45.84 'W), which has approximately 1289 hectares and it is located in the lower basin of the Tempisque River. Administratively, the site is part of Bagaces district and canton, Guanacaste province, within the Arenal Tempisque Conservation Area (ACAT) of the National System of Conservation Areas (SINAC), Costa Rica. It corresponds to one of the 12 RAMSAR wetlands of the country. Its ecological importance is focused on the reproduction and feeding of endangered species, aquatic, migratory and resident birds, it constitutes one of the largest nesting areas in the country. The aim of this study was to characterize the topography and the ecology of the site in terms of carbon storage, using remote sensing techniques and methods that could be easily replicated throughout the territory of Costa Rica, maximizing the use of open source software and cost free information resources; and that contributes to the management of the Cattail as an invasive plant in the site, as well as to the valuation of the ecosystem service of carbon capture and storage. This was possible due to the information obtained from scenes from the Sentinel-2 sensor of the Copernicus constellation of satellites of the European Space Agency, as well as data from the LVIS sensor (Land, Vegetation, and Ice Sensor) of NASA which consists of a laser altimeter system used to collect data on surface topography and 3D structure. This study was able to build a Terrain Elevation Model of the lagoon wetland, with topographical field verification, obtaining a range of elevation between 8,11 to 20,10 meters. Moreover, it was possible to perform a supervised classification with training areas based on NDVI values of scenes for the dry and rainy seasons. For the dry season (March 2020) the NDVI values varied from -0,10 to 0,83; while for the rainy season (October 2020) -0,51 to 0,89. In addition, it was possible to obtain an exploratory result of the biomass storage behavior, carbon and CO₂ equivalent stored in the Cattail, so it was possible to determine how the CO₂ equivalent was more than double during the dry season than during the rainy season, passing from 4,6 tons / ha in March to 2,0 tons / ha in October; possibly due to the ability of the species to proliferate invasively in water deficit environments. With this work it is expected to contribute to the state of knowledge about wetlands also the information generated contributes to decision-making to ensure its conservation and management.

Keywords: Wetlands, Sentinel-2, Supervised Classification, Free Software, Ecosystem Services, *Typha domingensis*, LVIS, Terrain Elevation Models.

Lista de tablas

Tabla 1. Humedales ubicados dentro del Parque Nacional Palo Verde de acuerdo con el Inventario Nacional de Humedales (2018) del SINAC.....	10
Tabla 2. Normativa relacionada al sitio en estudio, Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica.....	13
Tabla 3. Selección de fechas de imágenes Sentinel-2 (escenas) para la zona en estudio y nombre de los archivos descargados correspondientes al área de estudio.	32
Tabla 4. Descripción del archivo de los productos .IGE de elevación y altura LVIS L2 (Level 2 LVIS Ground Elevation)	39
Tabla 5. Datos del calculo EMC	53
Tabla 6. Resolución radiométrica de escenas Sentinel 2.....	56
Tabla 7. Rango de NDVI, clasificación por clases y definición de los identificadores de macro clases y clases.....	66
Tabla 8. Valores para los estratos definidos según biomasa de <i>Typha dominguensis</i>	69
Tabla 9. Resultados del muestreo en cada uno de los estratos para <i>Typha dominguensis</i>	70
Tabla 10. Valores de referencia utilizados para el calculo de biomasa, carbono y CO ₂ -equ en dos tipos de cobertura de vegetación herbácea en toneladas por hectárea.	71
Tabla 11. Ubicación geográfica de los hitos monumentados en campo, sistema de proyección CRTM05, Laguna Palo Verde, Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica.....	74
Tabla 12. Datos levantados en campo GNSS –versus- Datos estimados MED (IDW) .	76
Tabla 13. Datos LVIS –versus- Datos estimados MED (IDW)	77
Tabla 14. Variables hidroclimáticas para el período 2008-2017 en el Parque Nacional Palo Verde, Costa Rica.	78

Lista de figuras

Figura 1. Mapa de uso del suelo de la Estación Biológica Palo Verde de la Organización de Estudios Tropicales (OET), Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica.	12
Figura 2. Ubicación de la zona de estudio en Costa Rica, trayectoria de vuelo LVIS-NASA en el año 2005 y región de interés de la investigación, Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica. Fuente: National Aeronautics and Space Administration (2018), mapa base Google Satellite.	27
Figura 3. Ubicación de la zona de interés respecto al Parque Nacional Palo Verde, así como cobertura del sitio con datos capturados con el sensor LVIS de la NASA. Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica.	28
Figura 4. Ubicación y distribución de datos topográficos de los años 2003 y 2004, Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica.	29
Figura 5. Detalle de Equipo GNSS utilizado para el levantamiento topográfico en el Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica.	34
Figura 6. Detalle levantamiento topográfico alrededor de la laguna, Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica.	35
Figura 7. Ubicación en sitio del Hito1 y del Hito 2 en el Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica.	36
Figura 8. Forma de onda individual de LVIS.	41
Figura 9. Visualización de la nube de puntos datos LVIS, humedal de la Laguna Palo Verde, Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste. Costa Rica.	41
Figura 10. Visualización unificación de la información, Laguna Palo Verde, Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste. Costa Rica.	42
Figura 11. Software QGis-Interfaz SAGA.	44
Figura 12. SAGA carga de archivo shape.	45
Figura 13. Visualización de la información.	45
Figura 14. Método de interpolación IDW.	46
Figura 15. Configuración de parámetros.	47

Figura 16. Proceso de interpolación IDW.	47
Figura 17. Resultado del proceso de interpolación IDW.	48
Figura 18. Exportación de la información a formato ráster (parte 1).	48
Figura 19. Exportación de la información a formato ráster (parte 2).	49
Figura 20. Visualización de la interpolación IDW a 5m de resolución espacial en QGIS.	50
Figura 21. Recorte del área de estudio Laguna Palo Verde.	50
Figura 22. Visualización del área de estudio recortada, Laguna Palo Verde.	51
Figura 23. Visualización en rampa de colores del área de estudio recortada, Laguna Palo Verde.	51
Figura 24. Visualización del modelo con el método de interpolación IDW.	52
Figura 25. Visualización Histograma SAGA.	52
Figura 26. Ventana para la selección de escenas de Glovis-USGS.	57
Figura 27. En rojo se observa la máscara de corte utilizada para recortar las escenas, en borde negro se muestra el perímetro de la Laguna Palo Verde, la imagen base corresponde a escena de Sentinel-2 para el 14 de marzo del 2020.	58
Figura 28. Configuración de herramienta preprocesamiento de Semi-Automatic Classification Plugin de QGIS para corrección atmosférica.	59
Figura 29. Cálculo de NDVI utilizando la calculadora de bandas del complemento Semi- Automatic Classification Plugin.	60
Figura 30. Configuración de ventana en QGIS para la construcción de un juego de bandas.	61
Figura 31. Combinación de bandas 11-8-2 para realzar los espejos de agua, en escena Sentinel-2 del 14 de marzo del 2020 en Laguna Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica.	62
Figura 32. Combinación de bandas 8-4-3 para realzar vegetación, en escena Sentinel-2 del 14 de marzo del 2020 en Laguna Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica.	63
Figura 33. Malla de puntos regulares utilizada para el cálculo de áreas o regiones de interés (ROIs), Laguna Palo Verde, Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica.	64

Figura 34. Malla de puntos con valor de NDVI asignado en imagen Sentinel-2 del 15 de octubre del 2020, Laguna Palo Verde, Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica.	65
Figura 35. Pasos para la creación de las áreas de entrenamiento y la clasificación supervisada con SCP de QGIS.	67
Figura 36. Esquema resumen de la metodología empleada para clasificar la cobertura del humedal de la Laguna Palo Verde, Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste.	68
Figura 37. Modelo Digital de Terreno (MDT), Laguna Palo Verde, Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica.	72
Figura 38. Modelo de Terreno (MDT), con curvas de nivel, Laguna Palo Verde, Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica.	73
Figura 39. Descripción Hito 1 y Hito 2.	74
Figura 40. Histograma Modelo de Terreno (MDT), Laguna Palo Verde.	75
Figura 41. Balance hídrico según (Thorntwaite y Mather, 1957) para el período 1 de mayo de 2008 – 30 de abril de 2017, para la estación meteorológica del Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica.	78
Figura 42. Resultados de NDVI y combinación de bandas 8-4-3 y 11-8-2 que sirvieron de apoyo para la clasificación supervisada, Laguna Palo Verde, Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica.	80
Figura 43. Resultado de la clasificación supervisada en la Laguna Palo Verde, Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica.	81
Figura 44. Cuantificación de área en hectáreas por tipo de cobertura, Laguna Palo Verde, Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica, año 2020.	82
Figura 45. Comparación por época del cálculo de biomasa, carbono y CO ₂ -equ específicamente para la cobertura del tipo herbácea en la Laguna Palo Verde, Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica, año 2020.	84

Lista de anexos

Anexo 1. Metadato de datos LVIS.....	95
Anexo 2. Información de sensor Sentinel-2 y productos descargados en GloVis.	98

Lista de abreviaturas

- ASP: Área Silvestre Protegida.
- CO_{2-eq}: Dióxido de Carbono Equivalente.
- COP: Conferencia de las Partes, órgano supremo de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC).
- EMC: Estación de Medición Continua.
- ESA: European Space Agency (Agencia Espacial Europea).
- GLONASS: .Global Navigation Satellite System / Sistema Global de Navegación por Satélite.
- GloVis: Global Visualization Viewer.
- GNSS (Global Navigation Satellite System): Sistema mundial de navegación por satélite.
- GNSS: Global Navigation Satellite System / Sistema Global de Navegación por Satélite.
- IDW: Inverse Distance Weighted / Método de ponderación inverso a la distancia.
- IGN: Instituto Geográfico Nacional.
- KRG: Metodo de Regresión Krigeado.
- LVIS (Land, Vegetation, and Ice Sensor): Sensor de Tierra, Vegetación y Hielo.
- LIBE: Liberia.
- MINAE: Ministerio de Ambiente y Energía.
- MDT: Modelo Digital de Terreno.
- MDS: Modelo Digital de Superficie.
- MED: Modelo de Elevación Digital.
- NDVI: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.
- NN: Natural Neighbor / Método Vecinos naturales.
- NYCO: Nicoya.
- PNPV: Parque Nacional Palo Verde.
- RMSE: Error Medio Cuadrático.
- SCP: Semi-Automatic Classification Plugin.
- SINAC: Sistema Nacional de Áreas de Conservación.
- SP: Método de Mínima Curvatura.

- SNIT: Sistema Nacional de Información Territorial.
- TCI: True Color Images (Imágenes color verdadera).
- TIN: Triangular Irregular Network / Red de Triángulos Irregulares.
- USGS: Servicio Geológico de los Estados Unidos.
- VANT: Vehículo Aéreo No Tripulado.
- WGS84: World Geodetic System of 1984 / Sistema Geodésico Mundial de 1984.



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

SEP Sistema de
Estudios de Posgrado

Autorización para digitalización y comunicación pública de Trabajos Finales de Graduación del Sistema de Estudios de Posgrado en el Repositorio Institucional de la Universidad de Costa Rica.

Yo, Ana Julieta Calvo Obando, con cédula de identidad 1-1206-0574, en mi condición de autor del TFG titulado Caracterización topográfica y estimación de la biomasa, carbono y dióxido de carbono equivalente, mediante el uso de sensores remotos, en la laguna Palo Verde, Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica.

Autorizo a la Universidad de Costa Rica para digitalizar y hacer divulgación pública de forma gratuita de dicho TFG a través del Repositorio Institucional u otro medio electrónico, para ser puesto a disposición del público según lo que establezca el Sistema de Estudios de Posgrado. SI ☒ NO ☐

*En caso de la negativa favor indicar el tiempo de restricción: _____ año (s).

Este Trabajo Final de Graduación será publicado en formato PDF, o en el formato que en el momento se establezca, de tal forma que el acceso al mismo sea libre, con el fin de permitir la consulta e impresión, pero no su modificación.

Manifiesto que mi Trabajo Final de Graduación fue debidamente subido al sistema digital Kerwá y su contenido corresponde al documento original que sirvió para la obtención de mi título, y que su información no infringe ni violenta ningún derecho a terceros. El TFG además cuenta con el visto bueno de mi Director (a) de Tesis o Tutor (a) y cumplió con lo establecido en la revisión del Formato por parte del Sistema de Estudios de Posgrado.

INFORMACIÓN DEL ESTUDIANTE:

Nombre Completo: Ana Julieta Calvo Obando

Número de Carné: A61087 Número de cédula: 1-1206-0574

Correo Electrónico: calvobando@yahoo.com

Fecha: 17-feb-2021 Número de teléfono: 8718-9136

Nombre del Director (a) de Tesis o Tutor (a): Ph.D Julio César Calvo Alvarado

ANA JULIETA
CALVO OBANDO
(FIRMA)

Firmado digitalmente por ANA
JULIETA CALVO OBANDO
(FIRMA)
Fecha: 2021.02.17 14:55:40
-06'00'

FIRMA ESTUDIANTE

Nota: El presente documento constituye una declaración jurada, cuyos alcances aseguran a la Universidad, que su contenido sea tomado como cierto. Su importancia radica en que permite abreviar procedimientos administrativos, y al mismo tiempo genera una responsabilidad legal para que quien declare contrario a la verdad de lo que manifiesta, pueda como consecuencia, enfrentar un proceso penal por delito de perjurio, tipificado en el artículo 318 de nuestro Código Penal. Lo anterior implica que el estudiante se vea forzado a realizar su mayor esfuerzo para que no solo incluya información veraz en la Licencia de Publicación, sino que también realice diligentemente la gestión de subir el documento correcto en la plataforma digital Kerwá.



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

SEP Sistema de
Estudios de Posgrado

Autorización para digitalización y comunicación pública de Trabajos Finales de Graduación del Sistema de Estudios de Posgrado en el Repositorio Institucional de la Universidad de Costa Rica.

Yo, Adriana Ibarra Vargas, con cédula de identidad 1-0917-0981, en mi condición de autor del TFG titulado Caracterización Topográfica y Estimación de la Biomasa Carbono y Dióxido de carbono Equivalente, mediante el uso de sensores remotos, en La Laguna Palo Verde, Guanacaste.

Autorizo a la Universidad de Costa Rica para digitalizar y hacer divulgación pública de forma gratuita de dicho TFG a través del Repositorio Institucional u otro medio electrónico, para ser puesto a disposición del público según lo que establezca el Sistema de Estudios de Posgrado. SI ☒ NO ☐

*En caso de la negativa favor indicar el tiempo de restricción: _____ año (s).

Este Trabajo Final de Graduación será publicado en formato PDF, o en el formato que en el momento se establezca, de tal forma que el acceso al mismo sea libre, con el fin de permitir la consulta e impresión, pero no su modificación.

Manifiesto que mi Trabajo Final de Graduación fue debidamente subido al sistema digital Kerwá y su contenido corresponde al documento original que sirvió para la obtención de mi título, y que su información no infringe ni violenta ningún derecho a terceros. El TFG además cuenta con el visto bueno de mi Director (a) de Tesis o Tutor (a) y cumplió con lo establecido en la revisión del Formato por parte del Sistema de Estudios de Posgrado.

INFORMACIÓN DEL ESTUDIANTE:

Nombre Completo: Adriana Ibarra Vargas
Número de Carné: 931915 Número de cédula: 1-0917-0981
Correo Electrónico: topos226@gmail.com
Fecha: 09/02/2021 Número de teléfono: 83752607
Nombre del Director (a) de Tesis o Tutor (a): PhD. Julio Cesar Calvo Alvarado

ADRIANA
ISABEL IBARRA
VARGAS (FIRMA)

FIRMA ESTUDIANTE

Firmado digitalmente por
ADRIANA ISABEL IBARRA
VARGAS (FIRMA)
Fecha: 2021.02.17 20:10:57
-06'00'

Nota: El presente documento constituye una declaración jurada, cuyos alcances aseguran a la Universidad, que su contenido sea tomado como cierto. Su importancia radica en que permite abreviar procedimientos administrativos, y al mismo tiempo genera una responsabilidad legal para que quien declare contrario a la verdad de lo que manifiesta, puede como consecuencia, enfrentar un proceso penal por delito de perjurio, tipificado en el artículo 318 de nuestro Código Penal. Lo anterior implica que el estudiante se vea forzado a realizar su mayor esfuerzo para que no sólo incluya información veraz en la Licencia de Publicación, sino que también realice diligentemente la gestión de subir el documento correcto en la plataforma digital Kerwá.

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

i. Introducción al tema

Con el avance tecnológico de las últimas décadas la integración de la información se está volviendo el tópico del futuro, reconociendo el espectacular crecimiento de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en la vida de la gente y cómo su efecto se extiende más allá de sus impactos logísticos y económicos. Cada día, millones de personas utilizan los SIG, transformando la forma en que las organizaciones e instituciones administran sus bienes y atienden sus necesidades.

Actualmente, en todo el mundo cada vez se utilizan más las tecnologías de teledetección y de SIG como parte de las actividades de manejo, evaluación y monitoreo ambiental. En parte, esto se debe a la mayor accesibilidad de los datos espaciales y a la abundancia de productos de teledetección y de SIG que han mejorado su integración y capacidad de uso y consulta.

Desde esta óptica, la conservación, restauración y el manejo de humedales exigen conocer las relaciones funcionales de los humedales y los componentes fundamentales de los suelos, la altitud, la hidrología, las plantas hidrófilas y factores como el clima, la vida silvestre y las intervenciones humanas; siendo que los SIG pueden representar espacialmente todos estos componentes, recopilando y almacenando datos, analizando y recuperando información, y también actualizando, consultando, filtrando, ordenando, desplegando y utilizando esa información para determinar pautas y relaciones mediante superposiciones de temas.

En reconocimiento de este mayor uso de las tecnologías de SIG y conexas, la octava reunión de la Conferencia de las Partes en la Convención de Ramsar (COP8, Valencia, 2002) solicitó al Grupo de Examen Científico y Técnico (GECT) que, en colaboración con Wetlands International y la Secretaría de Ramsar, los organismos de teledetección y otras partes interesadas, examinará con más detenimiento la aplicación de los datos de teledetección, los SIG de bajo costo y los sistemas de clasificación para el inventario de los humedales y comunicara sus conclusiones a la COP9 (Resolución VIII.6), como parte

de su labor de mejorar el conjunto de orientaciones que se ponen a disposición de las partes contratantes sobre los temas de inventario, evaluación y monitoreo de humedales.

Existen varias iniciativas que han tratado o están tratando la utilización de la teledetección y los SIG para aplicaciones relativas a los humedales. Por ejemplo, el Inventario de los Humedales de Asia recomienda un enfoque jerárquico basado en mapas, con cuatro niveles de detalle relacionados con la escala del mapa que se incluyen dentro de un modelo de SIG normalizado (Lowry, 2007).

La Evaluación de Ecosistemas del Milenio está estudiando la condición, el estado y las tendencias de los ecosistemas mundiales, incluidos los humedales (Millennium Ecosystem Assessment, 2005) y las aplicaciones de la teledetección (DeFries y Pagiola, 2004). El proyecto Servicios de Cumplimiento de Tratados Utilizando la Observación Terrestre (TESEO) de la Agencia Espacial Europea ha evaluado la utilización de la teledetección para el inventario, evaluación, monitoreo de humedales y el manejo de los sitios, y se están llevando a cabo más actividades en esa esfera en varios sitios Ramsar a través de su proyecto GlobWetland (Lowry, 2007).

Los avances se han encaminado hacia la centralización del software de SIG en servidores de aplicación y servidores Web para prestar los servicios de redes a cualquier cantidad de usuarios, y cada vez en mayor medida los SIG se instalan en dispositivos móviles (ordenadores de sobremesa y de mano) para aplicaciones de SIG sobre el terreno. Asimismo, resulta significativo que esté aumentando la disponibilidad de conjuntos de datos de SIG de bajo costo, especialmente mediante la utilización de las tecnologías de cartografía de Internet utilizando programas y datos que resultan más beneficiosos para las aplicaciones de monitoreo de humedales cuando están integrados con datos obtenidos mediante teledetección. Así, proporcionan una perspectiva temporal de los cambios en el medio ambiente, y con medios para identificar o clasificar los rasgos del paisaje.

Es importante tener en cuenta que la utilización de los SIG y los sensores remotos, no sustituyen totalmente la necesidad de verificación sobre el terreno, ni a otros medios de validación de datos, aunque puede servir para desarrollar programas de validación más eficaces y efectivos. Dado este escenario y que cada sistema de humedal involucra

técnicas de monitoreo propias, en función de las condiciones físicas y ambientales en que se desarrollan, la presente investigación se enfocó en caracterizar topográficamente el humedal de la Laguna Palo Verde del Parque Nacional Palo Verde en Bagaces, Guanacaste, Costa Rica, sitio categorizado como humedal palustre de acuerdo con el último Inventario Nacional de Humedales de Costa Rica; así como también se avocó a estimar la biomasa, carbono y dióxido de carbono equivalente ($\text{CO}_{2\text{-eq}}$) almacenado en la *Typha dominguensis* en este sitio. Finalmente, se sintetizaron todos los procedimientos aplicados en una propuesta metodológica general fácilmente replicable y enfocada en el uso de recursos y software de acceso libre.

ii. Justificación del tema

La concentración atmosférica de los gases de efecto invernadero ha aumentado a partir de la revolución industrial y particularmente en los últimos 50 años debido a las diversas actividades humanas, sobre todo la utilización de combustibles fósiles y los cambios en el uso de los diferentes tipos de suelos. Lo anterior, ha contribuido a cambios en el clima del planeta (IPCC, 2001).

La temperatura de la superficie terrestre y marina ha incrementado, los patrones espaciales y temporales de las precipitaciones han cambiado; se ha elevado el nivel del mar y ha aumentado la frecuencia e intensidad de los fenómenos asociados con El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) (IPCC, 2001). El cambio climático representa un peligro para los ecosistemas y para la propia sobrevivencia del hombre en el planeta. Por esta razón, la importancia de conocer el papel de algunos ecosistemas como reguladores del ciclo del carbono en la tierra.

Así, por ejemplo, a escala global los humedales ocupan entre 5-8% de la superficie terrestre (Mistch y Gosselink, 2000; Nahlik y Fennessy, 2016), pero a pesar de ello, son considerados muy importantes globalmente por su potencial para almacenar carbono. Los humedales contienen una cantidad desproporcionada del carbono total del suelo de la tierra; teniendo entre 20-30% de los 1,500 Pg estimados de carbono de suelo global (Nahlik y Fennessy, 2016). Dicho potencial, se debe a la alta productividad de las plantas y a la baja descomposición de materia orgánica que ocurre en los suelos inundados (Collins y Kuehl, 2000).

A escala local, de acuerdo con el Inventario Nacional de Humedales de Costa Rica del año 2018, se establece que el país tiene 307 315,99 hectáreas de humedales, distribuidos en palustres, lacustres y estuarinos, y se le debe sumar 22 683,184 hectáreas de manglares. Este mismo inventario concluyó que el 77,36% del total de humedales inventariados corresponde a la categoría palustre, evidenciando la importancia de los pantanos a nivel nacional ya que resultan representativos de este sistema (Proyecto Humedales de SINAC-PNUD-GEF, 2018). De los humedales del país solamente 12 se encuentran declarados como de importancia internacional por la Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional Especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas (Convenio de Ramsar) (Gobierno de la República, SINAC, MINAE, Programa Nacional de Humedales, GEF, PNUD, 2017).

Por otra parte, el estudio de estos ecosistemas resulta complejo dado que existen diferentes categorizaciones de humedales, de acuerdo con el Decreto Ejecutivo del Gobierno de la República de Costa Rica, N° 35803-MINAET, denominado "*Criterios Técnicos para la Identificación, Clasificación y Conservación de Humedales*". Este Decreto reconoce cinco sistemas: fluvial, estuarino, marino, lacustrino y palustrino (Decreto Ejecutivo N° 35803-MINAET, 2010), siendo cada uno de éstos único en su tipo, pero en los que de forma general se reconocen diferentes servicios ecosistémicos clasificados como de soporte, aprovisionamiento, regulación, culturales y recreativos. Es dentro de los servicios ecosistémicos de regulación que se reconoce el valor ecosistémico de fijación y almacenaje de gases de efecto invernadero (Gobierno de la República, SINAC, MINAE, Programa Nacional de Humedales, GEF, PNUD, 2017), sin embargo, poco se conoce sobre el carbono que almacenan y su contribución en la mitigación de gases efecto invernadero.

Dado este escenario y que cada sistema de humedal requiere técnicas de monitoreo propias, en función de las condiciones físicas y ambientales en que se desarrollan, la presente investigación se enfocó en caracterizar topográficamente y en estimar la biomasa, carbono CO₂ equivalente almacenados por encima del espejo de agua, en el humedal de la Laguna Palo Verde como un ejemplo de humedal palustrino y con esto contribuir al estado del conocimiento de estos ecosistemas al brindar una herramienta

de fácil utilización para la estimación de parámetros que permitan cuantificar el servicio de regulación que brindan como sumideros de carbono.

La presente investigación se circunscribe a la caracterización topográfica y la estimación de la biomasa, carbono y CO₂-eq de la Laguna Palo Verde del Parque Nacional Palo Verde, humedal Ramsar por su importancia en la ruta de migración de aves. De acuerdo con Convención sobre los humedales (1998) *“El Bajo Tempisque presenta una gran heterogeneidad de humedales que tienen regímenes hidrológicos relacionados temporalmente, pero debido a la topografía y configuración de la zona se favorece la presencia de una serie de microcuencas que requieren una serie de acciones de manejo particulares y en diferentes intensidades”* (pag 13).

Tradicionalmente en este humedal, y específicamente en la Laguna Palo Verde, se acostumbraba la tenencia de ganado que controlaba la abundancia de la tifa y el Jaragua, sin embargo, al momento en que se creó el Parque Nacional Palo Verde y a lo largo del tiempo se extrajo el ganado, el cual hasta ese momento había actuado como medida de manejo para estas plantas.

Una vez eliminado el ganado del sitio, ocurrió el crecimiento masivo de especies como la tifa (*Typha dominguensis*), palo verde (*Parkinsonia aculeata*), jengibrillo (*Paspalum notatum*) y gamalote de bajura (*Paspalum geminatum*), con una consecuente drástica reducción del espejo de agua, lo que provocó la recomendación urgente para todos los humedales del Parque Nacional, incluyendo la Laguna Palo Verde, de reducir de forma agresiva e intensa las masas homogéneas de especies vegetales, básicamente *Typha dominguensis*, *Mimosa pigra* (zarza), *Parkinsonia aculeata*, a través de la corta, el fangueo, la quema o la inundación (Convención sobre los humedales, 1998).

De acuerdo con información publicada en periódicos nacionales de Costa Rica (Soto, 2017) *“La tifa (Typha dominguensis) reduce la profundidad y extensión de los espejos de agua en los humedales, los cuales son usados por las aves acuáticas para alimentarse y descansar en su ruta migratoria. La invasión por tifa se catalogó como problema ecológico desde 1986. En los últimos 30 años, la extensión de los humedales en Palo Verde disminuyó un 35% a causa de esta planta. Palo Verde es el único parque nacional que está autorizado –vía decreto ejecutivo– a realizar manejo activo, esto por*

recomendación de la comisión evaluadora de la Convención Ramsar, la cual vela por los humedales de importancia mundial (declaratoria que posee esta área silvestre protegida). El manejo activo implica una serie de técnicas de intervención como fangueo y rastra con maquinaria, quemas controladas y eliminación de vegetación, entre otras. Una de estas técnicas es el pastoreo con ganado. Mediante un permiso de uso, concedido vía resolución administrativa, ACAT autoriza a los finqueros a introducir ganado vacuno a ciertas zonas del parque nacional, una vez finalizada las labores de fangueo y rastra”.

Si bien se ha realizado manejo activo en el sitio, la presente investigación pretende realizar la caracterización topográfica del sitio a efectos de que la información generada, principalmente relativa al Modelo de Elevación Digital del Terreno en el área específica al humedal de la Laguna Palo Verde, sirva de insumo al momento en que se consideren otras técnicas de manejo como la inundación, la cual también ha sido recomendada y que eventualmente podría ser más autónoma de labores antrópicas, aprovechando el agua que conduce el Río Tempisque.

Adicionalmente, se pretende cuantificar la biomasa, carbono y CO_{2-eq} por encima del espejo de agua que se podría estar eliminando del humedal y que podría ser compensado mediante otras alternativas de captura de y almacenamiento de carbono, a efecto de mitigar el efecto de pérdida de CO_{2-eq} capturado al momento de eliminar vegetación como la tifa.

iii. Objetivos

Objetivo general:

Caracterizar topográfica y ecológicamente en términos de almacenamiento de carbono el humedal de la Laguna Palo Verde del Parque Nacional Palo Verde, mediante técnicas metodológicas de aplicación de sensores remotos que puedan ser replicables en humedales similares de Costa Rica y que contribuya al manejo de la *Typha dominguensis* como planta invasora en el sitio, así como a la valoración del servicio ecosistémico de captura y almacenamiento de carbono.

Objetivos específicos:

1. Caracterizar topográficamente el humedal de la Laguna Palo Verde del Parque Nacional Palo Verde mediante técnicas convencionales y/o de aplicación de datos de sensores remotos y software de acceso libre.
2. Clasificar la cobertura de la tierra específicamente en el humedal de la Laguna Palo Verde del Parque Nacional Palo Verde mediante técnicas convencionales y/o de aplicación de datos de sensores remotos y software de acceso libre.
3. Estimar de forma exploratoria la biomasa, carbono y dióxido de carbono equivalente por encima del espejo de agua almacenados en el humedal de la Laguna Palo Verde del Parque Nacional Palo Verde mediante técnicas de aplicación de datos de sensores remotos y software de acceso libre.

iv. Delimitaciones

Se realizó la caracterización topográfica siendo que la presente investigación se avocó a desarrollar el caso específico del humedal de la Laguna Palo Verde del Parque Nacional Palo Verde el cual tiene un área aproximada de 1289 hectáreas, y se ubica administrativamente en el distrito y cantón de Bagaces, provincia Guanacaste, Costa Rica. Respecto a la estimación de la biomasa, carbono y dióxido de carbono equivalente ($\text{CO}_2\text{-eq}$) almacenado en humedales palustres, la investigación se enfocó en realizar una cuantificación exploratoria de éstas únicamente bajo cobertura de tifa.

v. Alcances del proyecto

La investigación maximizó el uso de software y datos teledetectados de acceso libre, con la visión de potenciar su uso en distintas áreas del conocimiento, así como en diferentes grupos de trabajo (instituciones públicas, privadas, ONGs, entre otras), con miras a que los resultados aquí obtenidos y su metodología sean fácilmente replicables a otras escalas de trabajo.

Se construyó un Modelo de Elevación Digital del Terreno del sector del humedal de la Laguna Palo Verde a efecto de disponer con información detallada de la variable topográfica del sitio. Así como también estimar la magnitud de $\text{CO}_{2\text{-eq}}$ que este sistema es capaz de almacenar en la cobertura de tifa.

vi. Limitaciones

Para el desarrollo de la presente investigación se asumieron los siguientes supuestos y condiciones de trabajo:

- 1) La variación topográfica en el sitio ha sido mínima a lo largo de las últimas décadas, por lo que la utilización de datos preexistentes de levantamiento topográfico y LVIS del año 2005 resultan insumos válidos para la presente investigación.
- 2) La información de campo preexistente no cubre la totalidad del área del humedal de la Laguna Palo Verde por lo que fue necesario realizar extrapolación de datos.
- 3) A pesar de que se ha aplicado la técnica de fangueo en el sitio, la misma no ha provocado una fuerte variación topográfica en las elevaciones en los sectores donde la misma ha sido implementada.
- 4) La estimación de la biomasa, carbono y $\text{CO}_{2\text{-eq}}$ principalmente durante la temporada lluviosa, será por encima del espejo de agua y enfocada en aquella cobertura del tipo herbácea donde prolifera la tifa.
- 5) Durante la época seca, considerando el déficit hídrico característico del sitio en estudio, las imágenes reflejaron un elevado porcentaje de biomasa aérea y no necesariamente sobre el espejo de agua.
- 6) De acuerdo con Calvo-Alvarado y Arias (2004), Castillo-Núñez y Guzmán Álvarez (2004), Trama (2005), Guizada Duran (2018); en la Laguna Palo Verde del Parque Nacional Palo Verde se han reportado formaciones masivas de diferentes especies tales como tifa (*Typha dominguensis*), palo verde (*Parkinsonia*

aculeata), jengibrillo (*Paspalum notatum*) y gamolote de bajura (*Paspalum geminatum*), zarza (*Mimosa pigra*). La presente investigación parte del supuesto de que las categorías de cobertura de la tierra que se clasifiquen como zonas de herbáceas están cubiertas de tifa y a razón de esto se utilizarán los valores de biomasa de esta especie para calcular de forma exploratorio la reserva de carbono y CO₂-eq de esta cobertura.

- 7) Existió una limitación de procesamiento ya que existen insumos que requieren de significativos recursos informáticos para ser procesados.
- 8) Dada la epidemia del COVID19 y las restricciones sanitarias para la circulación de vehículos, durante el año de ejecución de esta investigación (año 2020) se limitó considerablemente la posibilidad de realizar trabajo de campo.

CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 Área de estudio

Este proyecto se desarrolla en el Parque Nacional Palo Verde, específicamente en el humedal de la Laguna Palo Verde (Latitud 10° 20' 2.50" N Longitud 85° 20' 45.84" W), la cual tiene un área aproximada de 1289 hectáreas; administrativamente este sitio se ubica en el distrito y cantón de Bagaces, provincia Guanacaste, dentro del Área de Conservación Arenal Tempisque (ACAT) del Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC), Costa Rica.

De acuerdo con el Mapa de Áreas Silvestres Protegidas (ASP) del Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), disponible a través del Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT) como un servicio Web Map Service del nodo del Centro Nacional de Información Geoambiental (CENIGA) por medio de la URL <http://18.218.14.134:8080/geoserver/wms?SERVICE=WMS&>, el Parque Nacional Palo Verde en su totalidad cuenta con una extensión de 18 249 hectáreas, de las cuales aproximadamente 1289 hectáreas corresponden a la Laguna Palo Verde (7% del total del ASP). Según el Mapa del Inventario Nacional de Humedales (2018), el Parque Nacional incluye otros humedales tales como los que se muestran en la Tabla 1 a continuación:

Tabla 1. Humedales ubicados dentro del Parque Nacional Palo Verde de acuerdo con el Inventario Nacional de Humedales (2018) del SINAC.

Nombre Humedal	Poblado de referencia	Ubicación dentro de ASP	Tipo de humedal	Clase de humedal	Condición
Corralillo 1	Rancho Horizonte	Parcialmente	Palustre	Pantano herbáceo	Natural
Corralillo 2	Bebedero - Rancho Horizonte	Parcialmente	Palustre	Pantano herbáceo	Natural

Nombre Humedal	Poblado de referencia	Ubicación dentro de ASP	Tipo de humedal	Clase de humedal	Condición
Corralillo 3	Hacienda Tamarindo	Parcialmente	Palustre	Pantano arbustivo	Natural
La Carreta 2	Hacienda Tamarindo	Parcialmente	Palustre	Pantano arbustivo	Natural
Los Ulate 2	Hacienda Tamarindo	Parcialmente	Palustre	Pantano arbustivo	Natural
Humedal Palo Verde 1	El Colmenar	Dentro	Palustre	Pantano herbáceo	Natural
Sector hacienda El pelón 1	N/A - Sin información	Parcialmente	Palustre	Pantano herbáceo	Natural
La Bocana	N/A - Sin información	Dentro	Lacustre	Laguna	Natural
Sector Catalina 1	Las Brisas	Dentro	Estuarino	Manglar	Natural
La Carreta	Hacienda Tamarindo	Parcialmente	Palustre	Pantano herbáceo	Natural
Quebrada La Mula 1	Hacienda Tamarindo	Dentro	Palustre	Pantano herbáceo	Natural

Por otra parte, de acuerdo con el mapa de uso de la tierra elaborado por la Organización de Estudios Tropicales (OET), para el año 2016 dentro del Parque Nacional Palo Verde se tienen identificados los siguientes humedales (Ver Figura 1): Laguna Palo Verde, Laguna Piedra Blanca, Laguna Virillal, Laguna Poza Verde, Laguna Bocana, Laguna Nicaragua.

Para la presente investigación se utilizó el polígono de la Laguna Palo Verde representado en la Figura 1 del Mapa de la Organización de Estudios Tropicales (OET).

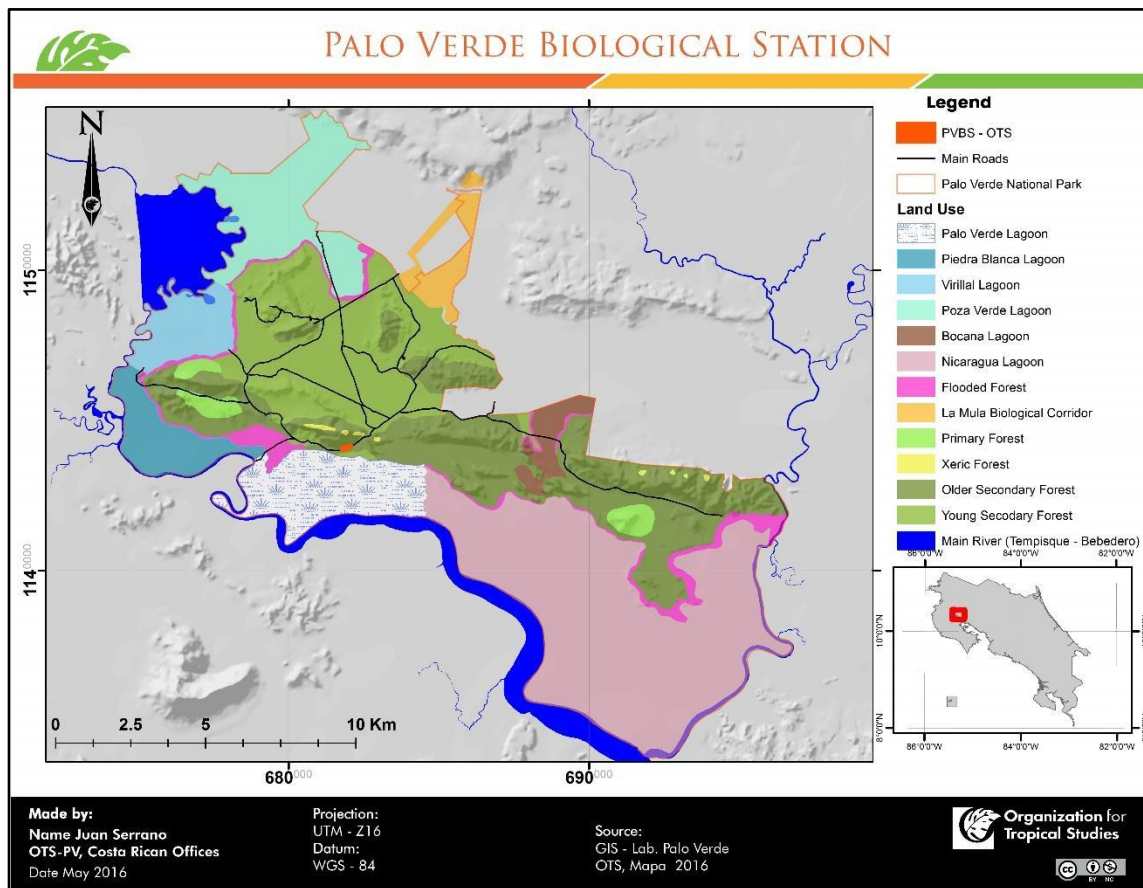


Figura 1. Mapa de uso del suelo de la Estación Biológica Palo Verde de la Organización de Estudios Tropicales (OET), Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica.

2.1.1 Antecedentes históricos

De acuerdo con la Organización para Estudios Tropicales (1991) “*Paloverde fue el extremo sur de una enorme hacienda, establecida por David Russell Stewart en 1923, que se extendió desde el Río Tempisque hasta las estribaciones del Volcán Miravalles. El Gobierno de Costa Rica expropió gran parte de la Hacienda Comeleo, incluyendo Paloverde en 1975 para un proyecto de colonización del ITCO. El Refugio de Vida Silvestre Paloverde fue creado por decreto ejecutivo el 29 de abril de 1977.*” (págs 130 y 132).

En la Tabla 2 se muestra un resumen de la normativa relacionada al sitio en estudio, la cual a su vez permite ampliar no solo los aspectos legales sino también los antecedentes históricos del sitio:

Tabla 2. Normativa relacionada al sitio en estudio, Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica.

Normativa	Título
Decreto Ejecutivo: 8492 del 27/04/1978	Declara Reserva Biológica Palo Verde (Ahora Refugio de Fauna Silvestre Dr. Rafael Lucas Rodríguez Caballero) (NO VIGENTE)
Decreto Ejecutivo: 10535 del 17/09/1979	Modifica denominación de Reserva Biológica Palo Verde a Refugio de Fauna Silvestre Dr. Rafael Lucas Rodríguez Caballero
Decreto Ejecutivo: 11541 del 30/05/1980	Declara Parque Nacional Palo Verde
Decreto Ejecutivo: 12765-A del 02/07/1981	Reforma Parque Nacional Palo Verde Provincia de Guanacaste
Ley 6794	Ley de Creación de Parques Nacionales y Reservas Biológicas. Ratifica como Leyes Decretos Creadores de Parques Nacionales y Reservas Biológicas.
Decreto Ejecutivo: 20082 del 09/11/1990	Incorpora al Parque Nacional Palo Verde el área correspondiente al Refugio de Fauna Silvestre "Rafael Lucas Caballero Rodríguez" y Redefine sus Límites
Decreto Ejecutivo: 23152 del 19/04/1994	Denomina terrenos comprendidos al oeste del Parque Nacional Palo Verde en Sector Dr. Rafael Lucas Rodríguez Caballero
Decreto Ejecutivo: 24426 del 03/12/1994	Amplía área del Parque Nacional Palo Verde

Decreto Ejecutivo: 27345 del 18/08/1998	Establece para el Parque Nacional Palo Verde Manejo Activo en sus Humedales y Áreas de Pasto y Crea Comité Asesor
Decreto Ejecutivo: 31591 del 18/11/2003	Redefine límites del Parque Nacional Palo Verde
Resolución: 23 del 28/03/2016	Plan General de Manejo del Parque Nacional Palo Verde
Decreto Ejecutivo: 39786 del 22/04/2016	Aprueba Reglamento Manejo Activo de Ecosistemas Parque Nacional Palo Verde y reforma decreto N° 27345 "Establece para el Parque Nacional Palo Verde Manejo Activo en sus Humedales y Áreas de Pasto y Crea Comité Asesor"
Decreto Ejecutivo: 39786 - A del 22/04/2016	Reglamento para el Manejo Activo de los Ecosistemas del Parque Nacional Palo Verde

2.1.2 Aspectos biofísicos

De acuerdo con la Organización para Estudios Tropicales (1991): *“La singular importancia de Paloverde está en la yuxtaposición de una gran ciénaga estacional entre el Río Tempisque y abruptas colinas calizas. Es la cadena aislada de colinas que corren más o menos paralelo al Río Tempisque, de oeste a este, de rocas calizas, duras y porosas, del Eoceno. La elevación máxima es alrededor de 200 m. En las cimas y en las estribaciones superiores generalmente no hay tierra, de modo que es un hábitat extremadamente xérico durante la estación seca. Entre las calizas y el Río Tempisque hay grandes pantanos herbáceos que se inundan estacionalmente, dominados por la tifácea, *Typha latifolia*, y por *Thalia geniculata*. El arbusto leñoso *Ipomoea* sp. y el árbol de Paloverde, *Parkinsonia aculeata*, se encuentran esparcidos en el pantano. Las aguas alcanzan su nivel máximo en septiembre u Octubre, y permanecen húmedas hasta el mes de Marzo.”* (pag 132-133).

2.2 Humedales

De conformidad con el artículo 32 de la Ley Orgánica del Ambiente No. 7554 en Costa Rica el Poder Ejecutivo, por medio del Ministerio del Ambiente y Energía (MINAE), podrá establecer áreas silvestres protegidas, en cualquiera de las categorías de manejo que se establezcan y en las que se señalan los humedales como una de dichas categorías. Esta misma Ley No. 7554, de conformidad con el artículo 40 define a los humedales como *“ecosistemas con dependencia de regímenes acuáticos, naturales o artificiales, permanentes o temporales, lénticos o lóticos, dulces, salobres o salados (...)”*.

Por otra parte, de acuerdo con el Decreto Ejecutivo N° 35803-MINAET denominado Criterios Técnicos para la Identificación, Clasificación y Conservación de Humedales, señala que: *“(...)los humedales constituyen uno de los ecosistemas más productivos del planeta, sustentan la vida de muchas especies de flora y fauna, especies declaradas en peligro de extinción o poblaciones reducidas sirviendo de nichos de reproducción, alimentación, crianza, desove y descanso para una variedad importante de especies, entre ellas especies de aves acuáticas migratorias, así como de especies de interés comercial y turístico como peces, crustáceos, moluscos, reptiles, anfibios, aves y mamíferos, por lo que requieren ser protegidos por el Estado, en apego a su política conservacionista, acato a las normas internacionales y liderazgo mundial en el tema ambiental.”*

En el artículo 7 del Decreto Ejecutivo N° 35803-MINAET, se indica que el Sistema de Clasificación de Tipos de Humedales propuesto por la Convención de RAMSAR, aprobado en la Recomendación 4.7, enmendada por las Resoluciones VI. 5 y VII. 11 de la Conferencia de las Partes Contratantes, será el que se utilizará en Costa Rica. Dicho Sistema de Clasificación de Humedales se describe a continuación:

Se clasifican los tipos de humedales en los siguientes sistemas:

- a. *Sistema fluvial: incluye todos los ambientes acuáticos contenidos en los drenajes que periódica, permanente o temporalmente mantienen agua en movimiento. Se excluyen aquellos ambientes con dominancia de árboles, arbustos, vegetación emergente persistente.*

- *Ríos/arroyos permanentes; incluye cascadas y cataratas.*
 - *Ríos/arroyos estacionales/intermitentes/irregulares.*
- b. *Sistema Estuarino: incluye hábitats de aguas profundas y tierras adyacentes con influencia de mareas, a menudo semi-encerradas por tierra, donde el agua oceánica es diluida por agua dulce que corre desde tierra adentro (manglares, marismas, rías, esteros y estuarios).*
- *Estuarios; aguas permanentes de estuarios y sistemas estuarinos de deltas.*
 - *Humedales intermareales arbolados; incluye manglares, pantanos de "nipa", bosques inundados o inundables mareales de agua dulce.*
 - *Pantanos y esteros (zonas inundadas) intermareales; incluye marismas y zonas inundadas con agua salada, praderas halófilas, salitrales, zonas elevadas inundadas con agua salada, zonas de agua dulce y salobre inundadas por la marea.*
- c. *Sistema Marino: consiste en las áreas litorales expuestas a los flujos de aguas oceánicas, incluyendo las extensiones marinas hasta el límite posterior de fanerógamas marinas o arrecifes de coral o, en su ausencia, hasta 6 metros de profundidad en marea baja. (Arrecifes de Coral)*
- *Lechos marinos submareales; se incluyen praderas de algas, praderas de pastos marinos, praderas marinas mixtas tropicales.*
 - *Costas marinas rocosas; incluye islotes rocosos y acantilados*
 - *Aguas marinas someras permanentes, en la mayoría de los casos de menos de seis metros de profundidad en marea baja; se incluyen bahías y estrechos.*
 - *Playas de arena o de guijarros; incluye barreras, bancos, cordones, puntas e islotes de arena; incluye sistemas y hondonales de dunas*
 - *Arrecifes de coral.*
- d. *Sistema Lacustrino: se refiere a los hábitats acuáticos con las siguientes características: 1) se presentan en una depresión topográfica o drenaje*

represados natural o artificialmente. 2) Se catalogan lagos (más de 2 metros de profundidad) o lagunas (si la profundidad es menor de dos metros). 3) Pueden contener vegetación como plantas emergentes, flotantes, musgos, líquenes. 4) La salinidad del agua puede ser mareal o no mareal (se considera agua dulce con salinidades iguales o menores a 0.5%) (Lagunas costeras).

- *Lagos permanentes de agua dulce (de más de 8ha); incluye grandes madre viejas (meandros o brazos muertos de río).*
- *Lagos estacionales/intermitentes de agua dulce (de más de 8ha); incluye lagos en llanuras de inundación.*
- *Lagos permanentes salinos/salobres/alcalinos.*
- *Lagos y zonas inundadas estacionales / intermitentes salinos / salobres / alcalinos*

e. Sistema palustrino: se incluyen todos los humedales de tipo no mareal, con las siguientes características: 1) pueden contener cobertura vegetal o no, la vegetación puede estar representada por dominancia de árboles, arbustos, vegetación arbustiva, vegetación emergente, musgos y/o líquenes. 2) Los niveles de profundidad en las depresiones no exceden dos metros. 3) Los valores de salinidad derivadas de sales oceánicas no exceden de 0.5% (yolillales, bosques anegados de agua dulce, pantanos).

- *Pantanos / esteros / charcas permanentes salinas / salobres / alcalinos.*
- *Pantanos / esteros / charcas estacionales / intermitentes salinos / salobres / alcalinos.*
- *Pantanos/esteros/charcas permanentes de agua dulce; charcas (de menos de 8 ha), --pantanos y esteros sobre suelos inorgánicos, con vegetación emergente en agua por lo menos durante la mayor parte del período de crecimiento.*
- *Pantanos/esteros/charcas estacionales/intermitentes de agua dulce sobre suelos inorgánicos; incluye depresiones inundadas (lagunas de carga y recarga), "potholes", praderas inundadas estacionalmente, pantanos de ciperáceas.*

- *Turberas no arboladas; incluye turberas arbustivas o abiertas ("bog"), turberas de gramíneas o carrizo ("fen"), bofedales, turberas bajas.*
- *Humedales boscosos de agua dulce; incluye bosques pantanosos de agua dulce, bosques inundados estacionalmente, pantanos arbolados; sobre suelos inorgánicos.*

A pesar de que en Costa Rica existe un marco normativo y jurídico dirigido a la protección y conservación de los humedales, los mismos han sido altamente impactados (Estado de la Nación, 2017; Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones, 2015); siendo que muchos humedales reflejan un alto grado de deterioro por aguas residuales y plaguicidas que aceleran los procesos de eutrofización (Sistema Nacional de Áreas de Conservación SINAC, 2014; Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones, 2015).

A escala global, de acuerdo con la Secretaría de la Convención de Ramsar (2015), los humedales siguen disminuyendo a escala mundial, tanto en extensión como en calidad. Se calcula que la extensión mundial de los humedales disminuyó entre un 64 y un 71% en el siglo XX y que la pérdida y degradación de los humedales continúan en todo el mundo. Como resultado de ello, disminuyen los servicios de los ecosistemas que los humedales proporcionan a la sociedad; mientras que a escala regional han revelado resultados negativos similares, aunque la tasa de pérdida varía considerablemente de una región a otra.

2.3 Modelos de Elevación Digital (MED)

Se denomina Modelo de Elevación Digital (MED) a un modelo simbólico, de estructura numérica y digital (Felicísimo, 1994) que pretende representar la distribución espacial de la elevación del terreno, siendo la altura una variable escalar (sobre un nivel de referencia) que se distribuye en un espacio bi-dimensional.

El MED desde su creación en la década de 1950 ha constituido un medio para el conocimiento y representación del terreno, utilizado para lograr análisis de los elementos presentes en el mismo mediante el uso de equipo y software especializado para tal fin.

En la actualidad los MED constituyen un medio para lograr la representación del relieve de forma versátil y funcional ya que a partir de los mismos se puede conocer la conformación o morfología del terreno (Modelo de Elevación Digital de Terreno MDT) así como los elementos de origen antrópico y la vegetación presente en el mismo (Modelo de Elevación Digital de Superficie MDS). El MDS representa todos los elementos existentes o presentes en la superficie de la tierra tales como vegetación, edificaciones, infraestructura y el terreno propiamente. Mientras que el MDT recrea la forma del terreno una vez que fueron removidos todos los elementos ajenos al mismo como son la vegetación, edificaciones y demás elementos que no forman parte del terreno.

2.3.1 Métodos de Elaboración del MED

Los métodos para la generación de los MED pueden dividirse en dos grupos:

- 1) Métodos directos: estos se obtienen a partir de mediciones que se realizan directamente sobre el terreno real, en los cuales podemos citar:
 - La toma directa de datos por medio de levantamientos topográficos con estación total o con GPS.
 - Uso de altímetros transportados desde una plataforma aérea como el radar o láser.
- 2) Métodos indirectos: cuando se utilizan documentos analógicos o digitales elaborados previamente para generar un MED, en los cuales podemos citar:
 - La digitalización de curvas de nivel y puntos de altura de la cartografía topográfica realizada mediante procesos convencionales de conversión automática (mediante escáner y vectorización) o manual (uso de tableta digitalizadora o en pantalla) o restitución fotogramétrica numérica, analítica y digital (procesos fotogramétricos).

La variedad de métodos disponibles para obtener un MED, ofrece posibilidades que deben ser seleccionadas según un criterio técnico y económico. Una correcta decisión

al respecto permite cumplir con los objetivos técnicos, con la mejor relación costo/beneficio posible.

En términos generales, los datos para conformar un MED, pueden provenir de:

- a) Levantamientos de campo usando receptores GPS o estaciones totales: uso de estaciones topográficas realizadas en el campo mediante dispositivos que permiten la grabación de datos puntuales que se interpolan posteriormente, en paralelo con el uso sistema global de localización mediante satélites, que permite estimaciones suficientemente precisas de latitud, longitud y altitud de un punto, posteriormente se deben interpolar los datos con herramientas informáticas de post proceso, los MED que se generen con estos datos tendrán alta exactitud.
- b) Fotografías aéreas e imágenes satelitales: el uso de este tipo de productos es una de las maneras más efectivas para producir y actualizar mapas topográficos en regiones de tamaño medio y grande, dando la mejor relación costo/beneficio. Los MED obtenidos en base a fotografías aéreas, pueden presentar una enorme variedad en la exactitud del mismo, dependiendo de la altura de vuelo y la distancia focal de la cámara, la exactitud en el apoyo de campo, el método de aerotriangulación utilizado, la resolución al escanear las fotos, así como la experiencia del operador y el instrumental utilizado. No hay tanta variedad cuando las imágenes son obtenidas por satélites.
- c) Radar con antena de apertura sintética (SAR): es ampliamente utilizado, ya que es muy sensible a las variaciones del terreno. La imagen radar es producida por un sensor activo que emite microondas, recibiendo y registrando los ecos reflejados por el objetivo. La ventaja sobre sistemas infrarrojos y ópticos es que las imágenes radar siempre son nítidas independientemente de que se capten de día, de noche, o bajo cualquier condición climática. La relación costo/beneficio es similar a la de otras imágenes de satélite, aunque en contrapartida la frecuencia de las observaciones es menor.
- d) LIDAR (Light Detection and Ranging): es un sistema activo, por lo que envía energía electromagnética y registra la reflejada por la superficie del terreno y los

objetos sobre el mismo. El sistema fue mejorando la resolución y el scanner láser aerotransportado (ALS) y se convirtió en una importante herramienta opcional para sensores remotos, fotogrametría, y mapeo (Ackermann, 1996). Este sistema es de gran ayuda cuando la fotogrametría falla o se torna demasiado costosa, como por ejemplo en áreas con vegetación muy densa (Estornell et al., 2007). El costo de producir un MED con esta tecnología es alto.

- e) Mapas topográficos existentes y digitalización cartográfica: en general, los países tienen cartografiados sus territorios, y dependiendo de los recursos invertidos en esta tarea, la calidad de los mapas topográficos suele ser variable. Costa Rica dispone de cobertura completa a escala 1:5 000, con curvas de nivel a cada 10 m de equidistancia. Si bien existen cartas a escala 1:1 000 con curvas cada 2m, no cubren la totalidad del área nacional, solamente las áreas urbanas. Claramente, la escala de la carta topográfica condicionará la equidistancia de las curvas, y en consecuencia la exactitud y resolución del MED a realizar. En general, se espera que la exactitud de un punto aislado esté entre $1/2$ y $1/3$ del intervalo de la curva (Méndez, 2010).

2.3.2 Algoritmos de interpolación para generar un MED

Se han propuesto diferentes algoritmos de interpolación a partir de curvas de nivel, así como múltiples métodos para establecer comparaciones entre los mismos (Wise, 2000; Li et al, 2005) llegando a la conclusión de que no existe un único algoritmo óptimo para todas las situaciones (Nelson et al, 2009).

En la siguiente lista se indican los algoritmos de interpolación que están disponibles en el software de interpolación de código abierto SAGA, el cual se utilizó en la presente investigación. Entre paréntesis se encuentran las abreviaturas que se usan en las figuras y tablas.

- a) Inverse Distance Weighted (método de ponderación inverso a la distancia (IDW)): Este algoritmo calcula los valores de las celdas por medio de una composición ponderada de los datos de la muestra, el modelo sugiere que el resultado

predicho reduce su incidencia en la medida en que aumenta la separación entre el punto a evaluar y los puntos de su entorno.

- b) Spline (Método de mínima curvatura (SP)): la interpolación se realiza ajustando un conjunto de funciones a los datos de entrada. El usuario puede modificar las características de la superficie generada manipulando dos parámetros de tensión y suavizado (Mitásová y Hofierka, 1993), sugiriendo que los splines regularizados con un parámetro de tensión adecuado serían el algoritmo de interpolación más conveniente, produciendo superficies suavizadas y ajustadas a las curvas; también puede obtener sus derivadas de manera que el mismo método genera mapas de pendientes, orientaciones y otras variables topográficas del MDT.
- c) Triangular Irregular Network (Red de Triángulos Irregulares (TIN)): las curvas de nivel se descomponen en puntos a partir de los que se crea una triangulación óptima. Los valores de altitud, pendiente y orientación se interpolan en el interior de cada triángulo mediante operaciones geométricas a partir de las coordenadas de los vértices. Una posibilidad interesante es que permite utilizar información secundaria.
- d) Natural Neighbor (Vecinos naturales, N.N, divisorias y otras líneas de ruptura): Es una técnica de interpolación que utiliza las regiones naturales locales generadas alrededor de cada punto para elegir y ponderar la elevación de los puntos vecinos. Esta técnica de interpolación tiene la ventaja de que no necesita la introducción de ningún parámetro adicional, y los resultados son aceptables en puntos muestrales con una distribución irregular. Esta eventual comodidad para el proceso, puede ser un inconveniente, si se tiene en cuenta el escaso número de parámetros de decisión que emplea la técnica.
- e) Kriging (Utilización de regresión-krigeado incluyendo líneas de ruptura (KRG)): Es una técnica de interpolación geoestadística que determina el valor de la elevación apoyado en el cálculo del promedio de las elevaciones más próximas. Su cómputo se apoya en la teoría de la variable regionalizada, que presupone que la variación espacial de una variable está dada en función de tres grandes módulos: (1) módulo estructural que tiene una tendencia constante (componente determinístico), (2) módulo aleatorio que se conoce como variable regionalizada

y que se encuentra espacialmente correlacionado y, (3) módulo aleatorio no correlacionado de error no explicable conocido como error residual (Hengl et al., 2008).

2.3.3 Validación de un MED.

La precisión de los MED está sujeta a muchos factores, como la calidad de la fuente de los datos, errores humanos en el muestreo, y errores en el modelo matemático usado para interpolar. Kumler (1994) desarrolló una metodología para estudiar la causa del error compilado por diferentes enfoques. Gao (1997) estudió la resolución y la precisión de la representación del terreno por medio de una retícula regular a una micro-escala. Rees (2000) estudió la precisión de los MED interpolados a altas resoluciones y demostró que la interpolación bilineal simple produce resultados apropiados para aplicaciones MED. Li et al. (2000) discuten sistemáticamente la teoría de los MED especialmente en la precisión del análisis de los modelos y deducen la precisión de los modelos basados en estructuras ráster. Kinder (2003) argumentó que las técnicas de interpolación de orden superior fueron siempre más precisas que las generadas por la interpolación bilineal. La elección óptima de cualquier método de interpolación debe estar regida por una evaluación de su eficiencia.

Un simple histograma de las elevaciones permitirá descubrir anomalías no detectables con la simple visualización, como el que los valores de las curvas de nivel aparezcan con excesiva frecuencia, sin embargo, puede estimarse el error medio mediante un muestreo de errores.

De acuerdo a la teoría de errores desarrollada por Gauss, se ha adoptado el Error Medio Cuadrático (RMSE) como el modelo matemático más exigente para calcular el error de un MED, por lo que su uso facilita la comparación de los valores obtenidos; lo que se pretende es establecer y cuantificar las diferencias más significativas encontradas entre la aplicación de estos algoritmos usados para la modelación de superficies.

Por otra parte, Willmott (1982) sugiere que la mejor medida para determinar el desempeño del modelo es el RMSE ya que resume las diferencias entre lo calculado por

el modelo y lo que ocurre en la realidad. Al analizar la medida estadística con error (RMSE), se tiene la siguiente situación:

$$RMSE_{elev} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_p - Z_0)^2}{n - 1}}$$

Donde N es el tamaño de la muestra de errores.

El RMSE es uno de los descriptores tradicionalmente utilizados para cuantificar los errores en un MED. Tiene el inconveniente de que necesita valores de elevación real y no informa acerca de la distribución espacial de los errores y su posible autocorrelación.

CAPITULO 3: METODOLOGÍA

3.1 Tipo de investigación

El enfoque implementado en esta investigación fue de tipo aplicado, en la cual se pretendió tener un alcance de tipo descriptivo al desarrollar un estudio y caracterización del sitio de estudio desde un enfoque técnico rigurosamente fundamentado en conceptos teóricos, así como al desarrollar un ejemplo de aplicación a un problema específico. De acuerdo con Lozada (2014) *“(...) en este tipo de investigación se tiene por objetivo la generación de conocimiento con aplicación directa y a mediano plazo en la sociedad o en el sector productivo”*.

3.2 Instrumentos e Insumos

El primer objetivo específico de la investigación se enfocó en realizar la caracterización topográfica y construcción de un MED, mientras que el segundo y tercer objetivo específico se enfocó en la clasificación de la cobertura del humedal de la Laguna Palo Verde y, la estimación de la biomasa, carbono y dióxido de carbono equivalente en la misma. Para el cumplimiento de dichos objetivos se realizó una revisión bibliográfica de diferentes fuentes documentales tales como bases de datos, artículos científicos, documentos técnicos, manuales, entre otros.

Al tratarse de una aplicación práctica se emplearon los siguientes recursos o insumos para análisis de forma generalizada para el cumplimiento de todos los objetivos:

- **Polígono de la Laguna Palo Verde:** Este polígono fue requerido para aplicar los procedimientos para la caracterización topográfica, la construcción del MED y para la estimación de la biomasa, carbono y CO₂-eq, dado que corresponde a la zona de interés. Se utilizó el mapa en formato JPEG (Figura 1) del uso del suelo de la Estación Biológica de Palo Verde, el cual se descargó desde la página Web de la Organización para Estudios Tropicales (OET) (<https://tropicalstudies.org/geographic-information/>). De este mapa se extrajo el polígono de la Laguna Palo Verde, en primera instancia georreferenciándolo

mediante la herramienta Georreferenciador GDAL disponible en QGIS 3.8.2-Zanzibar y utilizando como puntos de control para la georreferenciación la grilla del mapa. Una vez georreferenciado se procedió a vectorizarlo en un archivo formato shapefile mediante su digitalización a escala 1:5000. El sistema de proyección de entrada y salida de la imagen fue UTM Zona 16N (EPSG 32616), y mediante transformación lineal se obtuvo un error medio de georreferenciación de 0,038 metros. El área total de la laguna se estimó en 1 289 hectáreas. Finalmente, dicho polígono fue re proyectado al Sistema de Proyección CRTM05 (EPSG 5367).

- **Datos sensor LVIS (Land, Vegetation, and Ice Sensor):** De acuerdo con National Aeronautics and Space Administration (2018), el Sensor de Tierra, Vegetación y Hielo de la NASA o "LVIS", es un sistema de altímetro láser para imágenes aéreas de gran amplitud que se desplaza sobre las áreas objetivo para recopilar datos sobre la topografía de la superficie y su estructura 3D. Utiliza un sistema que incluye un láser de longitud de onda de 1064 nm y 3 detectores, se digitaliza todo el historial de tiempo de los pulsos de salida y retorno, lo que permite una determinación inequívoca de la estructura del impulso de retorno y del rango. Combinado con el conocimiento de la posición de la aeronave y su altura de vuelo, el sensor produce mapas topográficos con precisión y medidas de altura y estructura verticales de terreno en sitios anegados. El sensor LVIS opera a altitudes de hasta 20 km sobre el suelo y es capaz de producir una franja de datos de hasta 4 km de ancho con una huella de 5 m.

Según la información consignada en National Aeronautics and Space Administration (2018), el 22 de marzo del año 2005 se realizó un vuelo en Costa Rica con este sensor, específicamente en la zona de Palo Verde (Figura 2), Arenal y La Selva con las siguientes características:

- Plataforma de vuelo DOE King Air
- Altitud de vuelo nominal de 28 000 pies
- Ancho de franja nominal de 1,7 kilómetros
- Diámetro nominal de la huella de 20 metros.

Se contó con un set vectorial de datos del sensor LVIS de 130 025 puntos, y de éstos, específicamente para la zona de interés que corresponde al humedal de la Laguna Palo Verde de 27 920 puntos para un 21,5% del total de puntos (Figura 3, Anexo 1).

Los datos del sensor LVIS cubren aproximadamente el 77% del área de interés, lo cual representa aproximadamente 300 hectáreas sin cobertura de datos de dicho sensor (Figura 3).

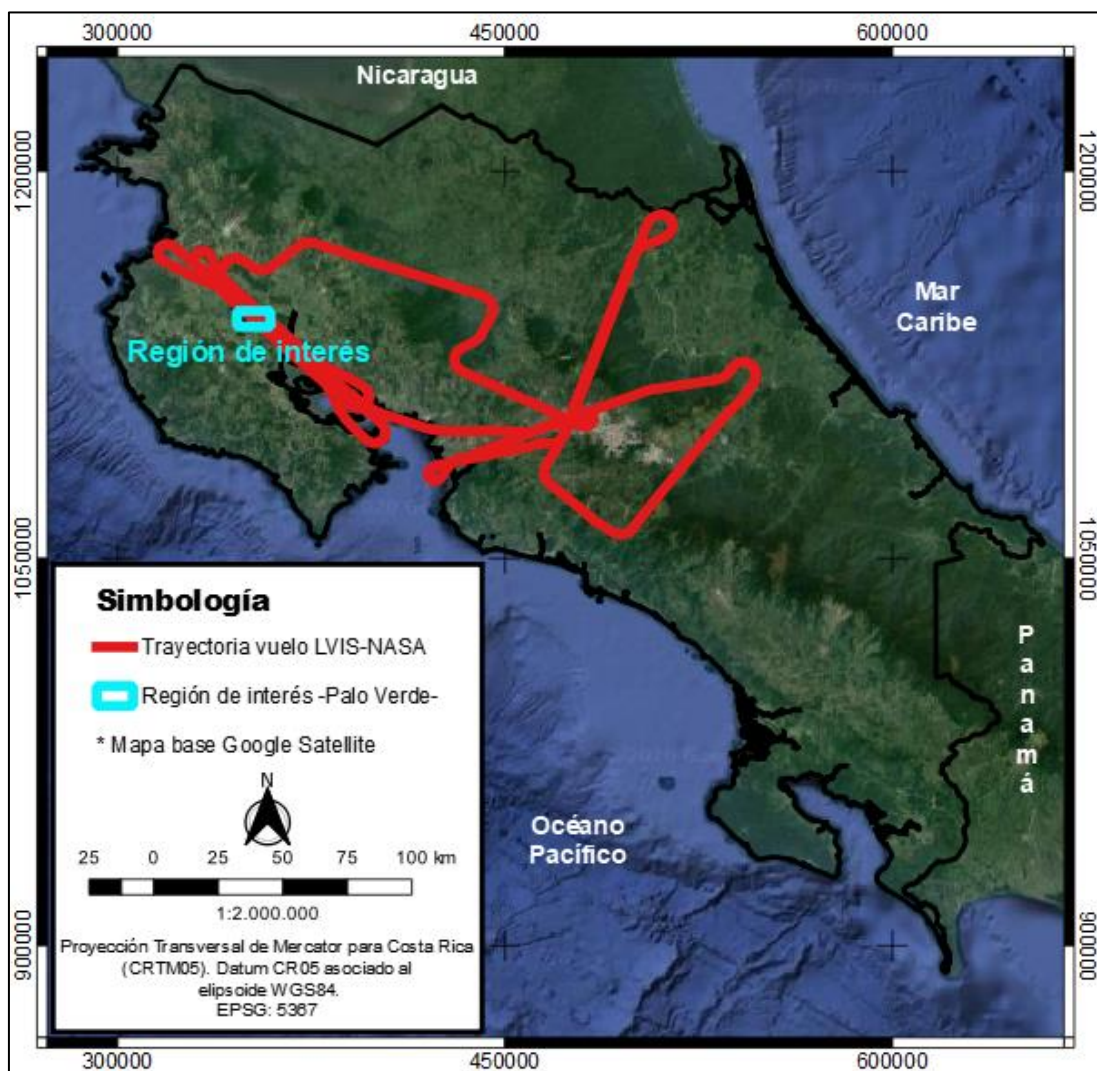


Figura 2. Ubicación de la zona de estudio en Costa Rica, trayectoria de vuelo LVIS-NASA en el año 2005 y región de interés de la investigación, Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica. Fuente: National Aeronautics and Space Administration (2018), mapa base Google Satellite.

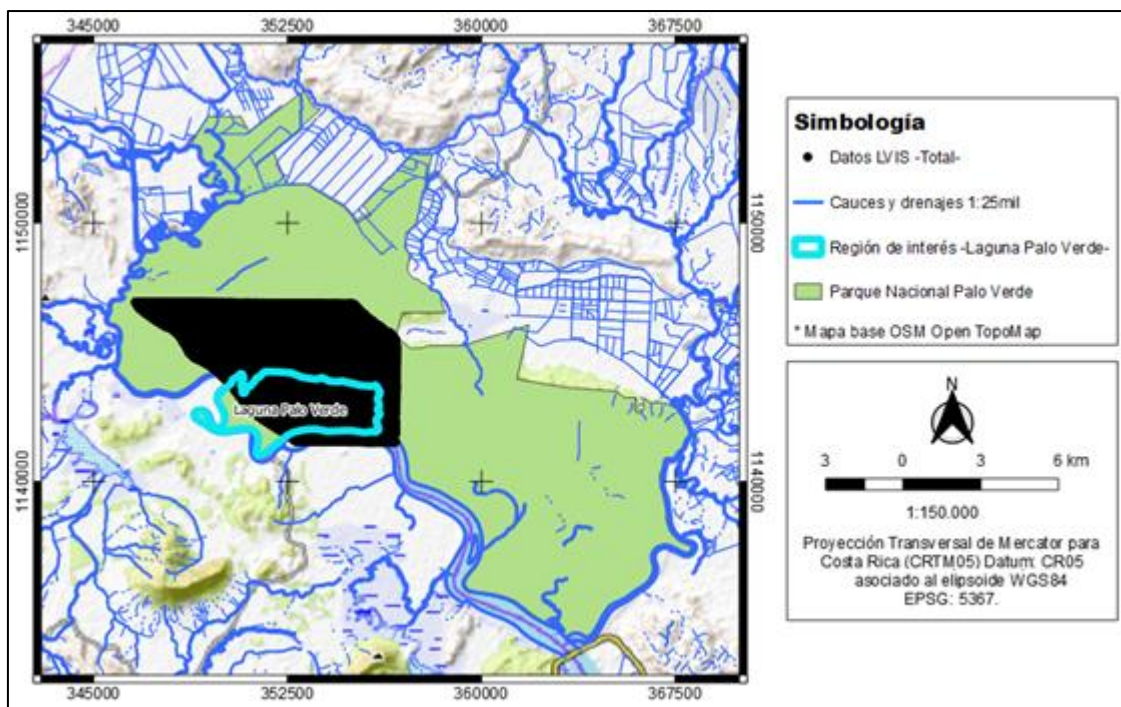


Figura 3. Ubicación de la zona de interés respecto al Parque Nacional Palo Verde, así como cobertura del sitio con datos capturados con el sensor LVIS de la NASA. Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica.

- **Levantamiento topográfico de campo:** Se dispuso de los datos en formato .csv de un levantamiento topográfico de 1 309 puntos en total, los cuales recortados al área de interés disminuyeron a 904 puntos (Figura 4). De acuerdo con Calvo-Alvarado y Castillo (2007) esta información fue capturada en campo durante los años 2003 y 2004, momento en el que se levantó una rejilla de puntos con teodolito con el fin de crear la topografía del humedal. Este trabajo no concluyó debido al escaso presupuesto del proyecto y a las dificultades prácticas de muestrear todo el terreno del humedal. Además, el estudio indica que los puntos fueron distribuidos a intervalos de 20 x 20 metros y ubicados principalmente frente a la estación Palo Verde de la OET y en los bordes del humedal.

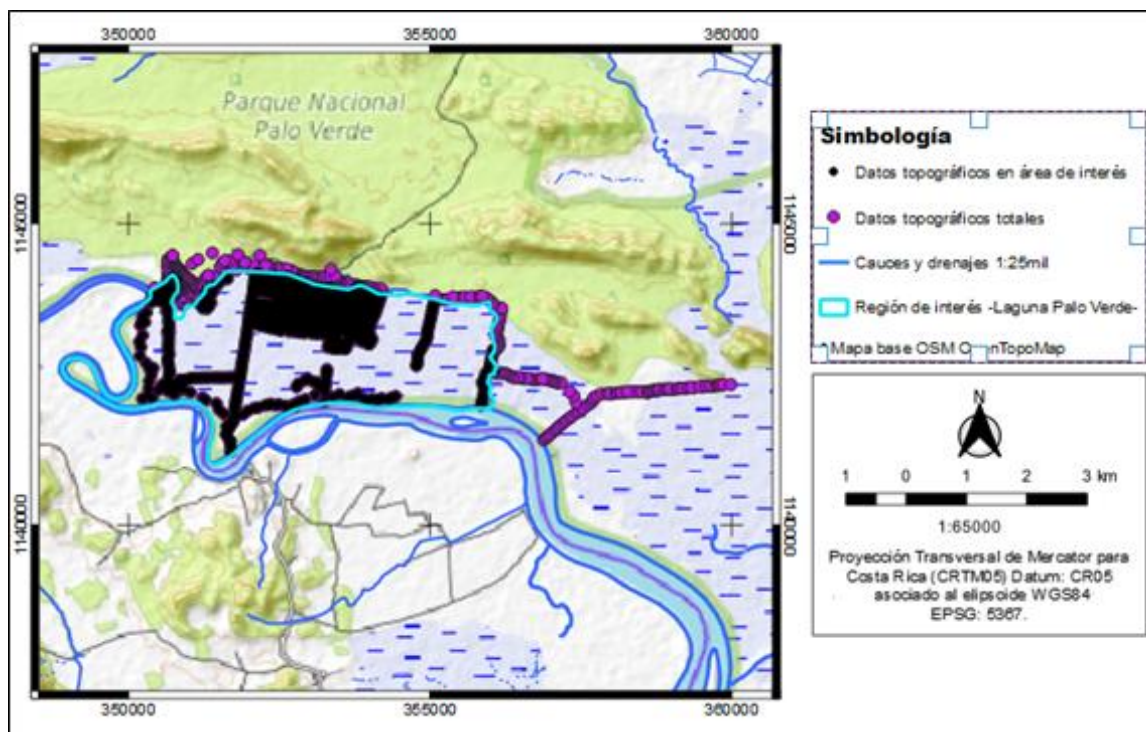


Figura 4. Ubicación y distribución de datos topográficos de los años 2003 y 2004, Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica.

- **Capa de bancos de nivel:** Se utilizó la capa de “*Bancos de Nivel*” escala 1:5 mil; del nodo del Registro Nacional – Instituto Geográfico Nacional (RN-IGN), IGN Varias Escalas, servicio Web Feature Service (WFS) disponible mediante la dirección de conexión y en línea a través del Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT) de Costa Rica (<http://geos.snitcr.go.cr/be/IGN/wfs?>) (http://www.snitcr.go.cr/Metadatos/full_metadata?k=Y2FwYTo6SUdOOjpiYW5jb3Nfbml2ZWw=). Al momento del desarrollo de la investigación, esta capa de información contenía un total de 3 756 bancos de nivel para todo el territorio costarricense, por tanto se procedió a realizar un anillo de amortiguamiento de 15 kilómetros alrededor del polígono de la Laguna Palo Verde, y se utilizó para cortar la capa de bancos de nivel. Con este procedimiento se redujo la cantidad de puntos a solamente 80 bancos de nivel, concentrados cerca del área de interés.
- **Hidrografía del sitio:** A efectos de contar con información de la hidrografía del sitio se utilizó la capa de “*Cauce y Drenaje*” escala 1:25 mil; del nodo del Registro Nacional – Instituto Geográfico Nacional (RN-IGN), IGN_25, servicio Web Feature

Service (WFS) disponible a través del Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT) de Costa Rica mediante la dirección de conexión <http://geos.snitcr.go.cr/be/IGN/wfs?>

- **Inventario Nacional de Humedales:** Se dispuso de la información del Inventario Nacional de Humedales por medio de la capa del mismo nombre; disponible en el nodo del Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), Centro Nacional de Información Geoambiental (CENIGA), específicamente como servicio Web Feature Service (WFS) mediante la dirección de conexión <http://geos.snitcr.go.cr/be/IGN/wfs?> del Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT) de Costa Rica.

Específicamente, para el objetivo de *“Caracterizar topográficamente el humedal de la Laguna Palo Verde del Parque Nacional Palo Verde mediante técnicas convencionales y/o de aplicación de datos de sensores remotos y software de acceso libre”* se requirió de los siguientes instrumentos e insumos:

- **Transporte:** se dispuso de un vehículo doble tracción para el transporte del personal y equipos lo más cercano posible al sitio de medición, además fue requerido navegar en lancha el Río Tempisque para tener acceso a ciertos puntos de la zona de estudio.
- **Equipo geodésico:** Se contó con dos equipos geodésicos GPS Receptor Leica Viva GS15, GNSS Smart antena de doble frecuencia con seguimiento de señales GPS (L1, L2, L2C, L5) y Glonass (L1, L2), un radio externo de ampliación de señal de radio que permite un alcance de 24 kilómetros entre los dos equipos para aplicar la corrección de coordenadas en tiempo real.
- **Estación total:** Marca Trimble M-3 con precisión angular de 2"seg, precisión lineal de (2mm+2ppmxDist), para medidas hechas con prisma, precisión lineal de (3mm+2ppmxDist), para medidas hechas sin prisma.
- **Navegador:** Navegador de mano modelo GPSMAP 62s, marca Garmin.

- **Software:** Se utilizó el programa de ajustes de redes Magnet Tools para realizar un ajuste amarrado a las estaciones de la red de estaciones de referencia de operación continua y utilizando el EGM208 como referencia vertical.
- **Otros:** En las mediciones se utilizaron instrumentos receptores de doble frecuencia GNSS, la exactitud obtenida fue concordante con las exactitudes que brinda dicho instrumental, así como con la recepción de buenas señales provenientes de los satélites de la constelación GNSS, que depende de la visibilidad hacia los mismos desde los puntos de estacionamiento de las antenas de los equipos, por lo que los sitios debieron ser muy bien escogidos.

Para el objetivo de *“Clasificar la cobertura de la tierra específicamente en el humedal de la Laguna Palo Verde del Parque Nacional Palo Verde mediante técnicas convencionales y/o de aplicación de datos de sensores remotos y software de acceso libre”* se requirió de los siguientes instrumentos e insumos:

- **Datos meteorológicos del sitio:** la investigación presenta un ejemplo de clasificación de la cobertura del humedal de la Laguna Palo Verde, durante un escenario de época seca y otro escenario de época lluviosa. Para efectos de determinar con precisión el mejor mes para cada época se utilizaron los datos de la estación meteorológica de la Organización de Estudios Tropicales (OET) que se ubica dentro del Parque Nacional Palo Verde. Específicamente se analizaron los datos de precipitación y temperatura mensuales de dicha estación, a partir del 1 de mayo del 2008 hasta el 30 de abril del 2017, para un total de nueve años de información. Se corrieron mediante hojas de calculo en Excel, nueve balances hídricos según la metodología de Thornthwaite y Mather (1957), a razón de poder determinar con precisión en cual mes o meses correspondía el mayor exceso de humedad (que correspondió al mes de octubre) y cual mes o meses al mayor déficit hídrico (que correspondió al periodo comprendido entre los meses de diciembre hasta abril).
- **Imagen multiespectral del sitio:** Para la estimación de la biomasa, carbono y CO₂-equ y la obtención de las imágenes utilizadas para dicha estimación, se utilizó el visor global del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) - Global Visualization

Viewer (GloVis) disponible mediante la siguiente dirección <https://glovis.usgs.gov/app>. Esta aplicación permitió seleccionar productos entre los siguientes sensores: ASTER Level 1T, DOQ, EO-1 ALI, EO-1 Hyperion, Global Land Survey, IRS AWiFS, IRS LISS-3, Landsat 1-5 MSS C1 Level-1, Landsat 4-5 TM C1 Level-1, Landsat 7 ETM+ C1 Level-1, OrbView-3, Sentinel-2, SRTM Void Filled. Para este estudio específico fue seleccionada una imagen representativa de la época seca (octubre) y otra de la época lluviosa (marzo) del sensor Sentinel-2 (Anexo 2) con una resolución espacial de 10 metros e imágenes multispectrales con cobertura nubosa igual o inferior al 20% a efectos de posteriormente comparar datos de forma temporal (Tabla 3). Bajo dicho criterio de búsqueda fue posible realizar la selección de escenas entre un total de 13 imágenes.

Tabla 3. Selección de fechas de imágenes Sentinel-2 (escenas) para la zona en estudio y nombre de los archivos descargados correspondientes al área de estudio.

Fecha (año/mes/día)	Nombre de archivo	Época	Cobertura de nubes (%)
2020/03/14	S2A_MSIL1C_20200314T160021_N0 209_R097_T16PFS_20200314T2109 48.SAFE	Seca	0-5
2020/10/15	S2B_MSIL1C_20201015T160149_N0 209_R097_T16PFS_20201015T1944 29.SAFE	Lluviosa	0-20

Notas: Todas las escenas cuentan con nivel de producto 1C y están en el sistema de proyección WGS84/UTM.

De acuerdo con (ESA Sentinel Online, s.f.(A)) los productos Sentinel-2 Nivel 1C presentan un nuevo formato de nomenclatura a partir de las escenas capturadas después del 6 de diciembre de 2016, la cual se detalla a continuación:

Donde:

- MMM: es el identificador de la misión (S2A: Sentinel-2A / S2B: Sentinel-2B).
- MSIXXX: MSIL1C denota el nivel de producto 1C (con reflectancia por encima de la atmósfera TOA), MSIL2A denota el nivel de producto 2A (Reflectancia por debajo de la atmósfera BOA).
- YYYYMMDDHHMMSS: la hora de inicio de la detección de toma de datos (fecha y hora).
- Nxxxyy: El número de referencia de procesamiento de PDGS (Payload Data Ground Segment).
- ROOO: Número de órbita relativa (R001 - R143).
- Txxxxx: Tile Número de campo del mosaico.
- <Product Discriminator>: tiene 15 caracteres de longitud y se usa para distinguir entre diferentes productos de usuario final de la misma toma de datos. Dependiendo de la instancia, el tiempo en este campo puede ser anterior o ligeramente posterior al tiempo de detección de la toma de datos.
- SAFE: Formato del producto (formato de archivo estándar para Europa).

Por tanto, la totalidad de las escenas cuentan con nivel de producto 1C, lo cual de acuerdo con (ESA Sentinel Online, s.f (B) y ESA Sentinel Online, s.f (C), la asociación entre la ESA y el USGS permite la distribución de los datos de reflectancia de la parte superior de la atmósfera (TOA) de nivel 1C. Además, el procesamiento de nivel 1C incluye correcciones radiométricas y geométricas junto con ortorrectificación para generar productos geolocalizados de alta precisión.

3.3 Procedimientos y análisis de la información recolectada

Los insumos descritos en el párrafo anterior se encuentran en distintos sistemas de proyección, tales como WGS84 UTM Z16N (EPSG 32616), WGS84 (EPSG 4326) y CRTM05 (EPSG 5367). Por tanto, previo a trabajar con la información, se realizó el proceso de reproyectarla a un mismo sistema de referencia, específicamente a proyección Transversal de Mercator para Costa Rica (CRTM05), datum CR05 asociado al elipsoide WGS84 (EPSG: 5367).

A continuación, se detalla la metodología empleada para el cumplimiento de cada objetivo específico:

3.3.1 Caracterizar topográficamente el humedal de la Laguna Palo Verde del Parque Nacional Palo Verde mediante técnicas convencionales y/o de aplicación de datos de sensores remotos y software de acceso libre.

Se requirió realizar verificación de campo del levantamiento topográfico previo realizado durante los años 2003 y 2004, así como del Modelo de Terreno producto del sensor LVIS. En esta parte de la investigación se utilizó la tecnología GNSS, para georreferenciar con precisión, en el orden de los centímetros, la ubicación de los bancos de nivel más cercanos del Instituto Geográfico Nacional, verificar algunas cotas de nivel en la zona de estudio, levantar nuevos puntos de nivel en lugares accesibles y monumentar dos hitos con información.

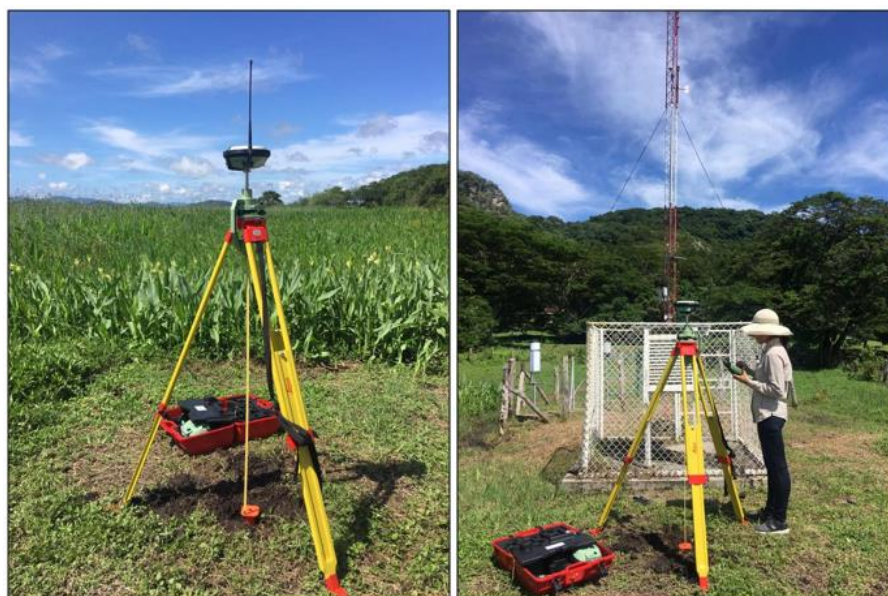


Figura 5. Detalle de Equipo GNSS utilizado para el levantamiento topográfico en el Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica.



Figura 6. Detalle levantamiento topográfico alrededor de la laguna, Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica.

Por la distancia a la que se encuentra este proyecto con respecto a las estaciones del Instituto Geográfico Nacional el cual es el ente regulador del sistema nacional de coordenadas, se colocaron dos puntos de control **Hito 1** e **Hito 2**, los cuales se establecieron con una separación de 3 030,29 m entre ellos. Para la ubicación de estos hitos se consideraron factores como la variable topografía y la necesidad de tener la mejor recepción de la señal de los satélites posible, esto con el fin de minimizar el error que se puede dar por la distancia (partes por millón).

En los equipos receptores se fijó un PDOP menor de cuatro, una máscara de elevación de 10° sobre el horizonte, observándose en los Hitos 1 y 2 por 4 horas de medición cada uno.



Figura 7. Ubicación en sitio del Hito1 y del Hito 2 en el Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica.

El Hito 1 se ubicó cerca de la estación meteorológica de la OET y el Hito 2 cerca de una construcción localiza por el muelle de lanchas. Las coordenadas tridimensionales (Este, Norte y Elevación) obtenidas por medio de esta tecnología, fueron utilizadas para comprobar la posición y precisión con respecto al levantamiento topográfico previo con el que se cuenta para la presente investigación, así como para georreferenciar en la proyección CRTM05 toda la información con la que se trabajó.

- 1) Se procedió a realizar una verificación en campo (en función de las condiciones de sitio), utilizando tecnología GNSS, para georreferenciar con precisión, en el orden de los centímetros, se levantó el banco de nivel BM 1147 el banco de nivel del Instituto Geográfico Nacional el más cercanos al sitio de estudio, y con esto verificar algunas cotas de nivel, así como también puntos específicos seleccionados aleatoriamente. Las coordenadas tridimensionales (Norte, Este y Elevación) obtenidas por medio de esta tecnología GNSS y con estación total, fueron utilizadas para comprobar la posición y precisión con respecto a los datos correspondientes a la nube de puntos de LVIS y los datos de topografía levantados entre el año 2003 y 2004, utilizados en esta investigación.

- 2) Las mediciones GNSS se realizaron en modalidad estática relativa con postproceso en gabinete. Se utilizaron como puntos base las siguientes Estaciones de Medición Continua (EMC): Liberia (LIBE) y Nicoya (NYCO) ubicadas en la provincia de Guanacaste bajo la administración del Instituto Geográfico Nacional.
- 3) También, se efectuaron levantamientos con navegador GPS para el trazado, guía y referencia de las rutas de acceso a los puntos de interés, así como para almacenar datos de algunos puntos de referencia importantes durante el trayecto.
- 4) Una vez establecida la modalidad de medición estática y efectuado el levantamiento de campo respectivo, se procedió a realizar el postproceso de los datos GNSS utilizando el programa MAGNET TOOLS. Dicho programa permite el cálculo de coordenadas georreferenciadas.
- 5) En primer lugar, se descargaron los datos GNSS (archivos crudos) por medio de los receptores de doble frecuencia marca Leica, modelo GS15. Durante este proceso se anotaron datos como el nombre del punto medido, la duración y el día de la medición, así como la altura a la cual se colocó la antena del receptor.
- 6) Mediante los servicios en línea que ofrece el Registro Nacional, a través del Proveedor de Servicio de Estaciones de Referencia “SpiderWeb” (<http://rim-data-gnss.rnp.go.cr/spiderweb/frmlIndex.aspx>), y la Universidad Nacional, a través del Centro Nacional de Procesamiento de Datos GNSS de la Escuela de Topografía Catastro y Geodesia (<http://www.cnpdg.una.ac.cr/index.php/download>), se procedió a descargar los datos GNSS de las estaciones de medición continua Liberia (LIBE) y Nicoya (NYCO) con las mismas horas de medición del Receptor GS15. Dichas EMC se utilizaron como puntos fijos y con coordenadas conocidas para el amarre horizontal y vertical de los puntos medidos.
- 7) Para realizar el cálculo de las coordenadas en el software MAGNET TOOLS, inicialmente se definieron variables como:

- Zona horaria (UTC-6, América Central).
 - Sistema de coordenadas (Datum WGS84, modelo geoidal EGM2008, proyección cartográfica CRTM05).
 - Parámetros del procesamiento de ajuste (nivel de confianza y criterio de rechazo de las observaciones).
- 8) Posteriormente, se cargaron los datos GNSS al proyecto creado, se eliminó el ruido en las observaciones (interferencia en la señal recibida) y se seleccionaron los vectores a utilizar, para luego proceder a realizar un post procesamiento de los datos.
- 9) Una vez concluido el paso anterior, se ingresaron y fijaron las coordenadas de los puntos conocidos: Liberia (LIBE) y Nicoya (NYCO), las cuales están integradas a la Red Geodésica Nacional de Referencia Horizontal de Primer Orden, y se realizó el ajuste de los puntos medidos con el receptor GS15. Estos se definieron como puntos base para la georreferenciación a la proyección cartográfica CRTM05 y al sistema geodésico CR05 de todas las mediciones de campo efectuadas para fines del proyecto.
- 10) Las elevaciones elipsoidales obtenidas con la tecnología GNSS en estos puntos fueron expresadas como elevaciones geoidales, por lo que no están estrictamente referidas al nivel medio del mar. **En ese sentido, no se utiliza la nomenclatura “msnm”.**
- 11) Se descargó la información y datos del sensor LVIS desde la página WEB <https://lvis.gsfc.nasa.gov/Data/Maps/CR2005Map.html> específicamente el archivo para el nivel 2 de datos, correspondiente a productos de elevación y altura LVIS L2 (LVIS L2 Elevation and Height Products en inglés), llamado [LVIS CR 2005 VECT 20060518 PaloVerde.zip](#)
- 12) Los archivos del LVIS descargados previamente se encuentran en los siguientes formatos:

- .ICE (LVIS Canopy Elevation = LVIS Elevación del dosel),
- .IGE (LVIS Ground Elevation = LVIS Elevación de la superficie)
- LVIS geolocalizada forma de onda (.IGW).

Dado que el interés del presente objetivo es caracterizar topográficamente el sitio, se procedió a trabajar únicamente con el archivo .IGE correspondiente a la elevación de la superficie. Los datos tienen un marco de referencia terrestre internacional (ITRF 2000) / WGS-84 elipsoide.

13) Se pre-procesaron los datos del sensor LVIS descargados previamente haciendo uso del software Lcc-win32 con el objetivo de transformar datos en formato binario a una salida de datos en formato ASCII. Este software se descargó de la dirección electrónica <https://lcc-win32.services.net/> En la Tabla 4 se muestra la descripción de los datos LVIS Ground Elevación (.IGE).

Tabla 4. Descripción del archivo de los productos .IGE de elevación y altura LVIS L2 (Level 2 LVIS Ground Elevation)

Artículo	Tamaño de Byte	Formato	Unidades	Descripción del Artículo
LFID	4	entero de palabra larga sin firmar		Identificación de archivo LVIS
número de disparo	4	entero de palabra larga sin firmar		Disparo láser asignado durante la recolección
hora	8	punto flotante de doble precisión	segundos	Segundos decimales UTC del día
Glon	8	punto flotante de doble precisión	grados	Longitud del modo detectado más bajo dentro de la forma de onda (grados este)

Artículo	Tamaño de Byte	Formato	Unidades	Descripción del Artículo
Glat	8	punto flotante de doble precisión	grados	Latitud del modo detectado más bajo dentro de la forma de onda (grados norte)
ZG	4	punto flotante de precisión simple	metros	Elevación media del modo detectado más bajo dentro de la forma de onda
RH25	4	punto flotante de precisión simple	metros	Altura (relativa a zg) a la que se produce el 25% de la energía de la forma de onda
RH50	4	punto flotante de precisión simple	metros	Altura (relativa a zg) a la que se produce el 50% de la energía de la forma de onda
RH75	4	punto flotante de precisión simple	metros	Altura (relativa a zg) a la que se produce el 75% de la energía de la forma de onda
RH100	4	punto flotante de precisión simple	metros	Altura (relativa a zg) a la que se produce el 100% de la energía de la forma de onda
TOTAL	52			bytes por registro

Nota: Los valores “zg” corresponden a la elevación de la tierra y el “RH100” para dosel superior.

Fuente: https://lvis.gsfc.nasa.gov/Data/Data_Structure/DataStructure_LDS102.html

Los productos de datos LVIS se basan en la información contenida en la forma de onda de retorno láser geolocalizada (el producto LVIS Nivel 1B). Las ubicaciones de varios modos y puntos reflectantes se extraen usando métodos de procesamiento de señales, luego se geolocalizan usando la información en el archivo L1B y se generan en los archivos de producto de Nivel 2. Estos incluyen elevaciones (con latitudes y longitudes asociadas) para el centro de los modos más bajo y más alto en la forma de onda, así como el retorno detectado más alto (por ejemplo, la parte superior del dosel). También se integra la energía contenida dentro de la forma de onda y se extraen las ubicaciones donde, por ejemplo, ocurre el 25, 50 y 75% de la energía de retorno total. Estos también

se geolocalizan en relación con un marco de referencia global y luego se diferencian con el producto zg para derivar una altura relativa (por ejemplo, RH25).

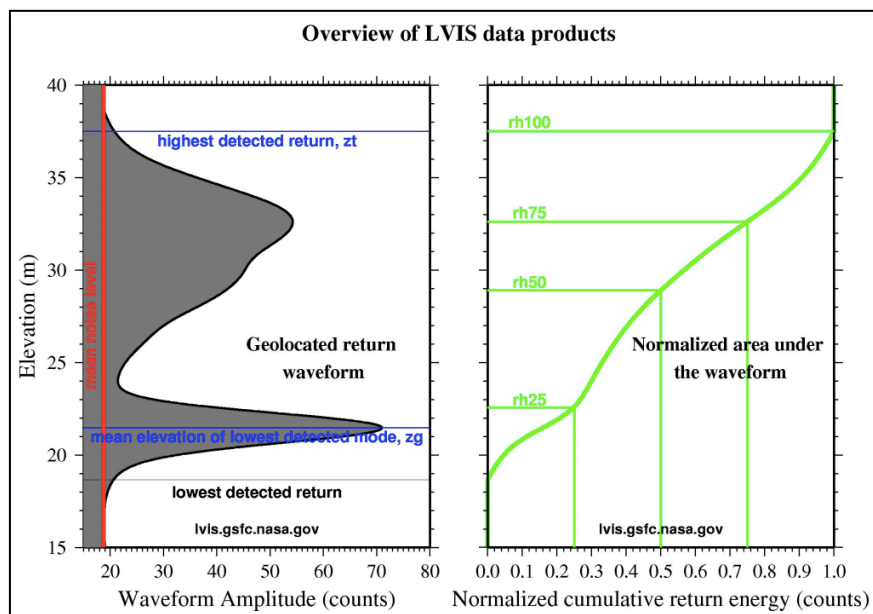


Figura 8. Forma de onda individual de LVIS

Fuente: <https://lvis.gsfc.nasa.gov/Data/DataStructure.html>

14) Con el procesamiento de los datos LVIS se obtuvo una nube de puntos que fue exportada al software de código libre QGIS.

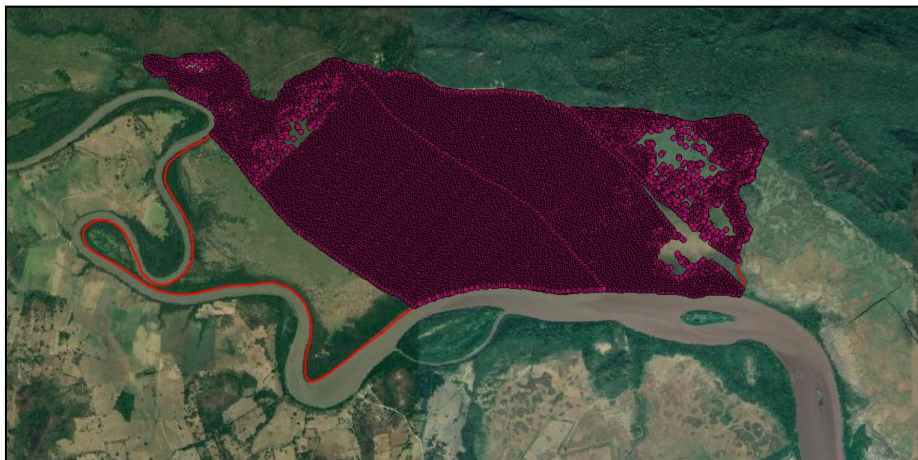


Figura 9. Visualización de la nube de puntos datos LVIS, humedal de la Laguna Palo Verde, Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste. Costa Rica.

- 15) Tomando como fuente de información los datos de campo levantados, los datos de la topografía realizada en 2003 y 2004 y los obtenidos del procesamiento de los datos LVIS, se procedió a unificarlos y reprojectarlos a un mismo sistema de referencia, específicamente a la proyección Transversal de Mercator para Costa Rica (CRTM05), datum CR05 asociado al elipsoide WGS84 (EPSG: 5367).



Figura 10. Visualización unificación de la información, Laguna Palo Verde, Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste. Costa Rica.

Al realizar el proceso anterior y tal como se observó en la Figura 10, no se cuenta con una cobertura total de información para el sitio de estudio por lo que fue necesario realizar una interpolación de datos en las zonas donde no se había capturado información de datos altimétricos. A continuación, se describe dicho procedimiento:

3.3.1.1 IDW: Método de ponderación inverso a la distancia (Inverse Distance Weighted)

El método de interpolación de *ponderación inverso a la distancia* (IDW), se basa en el principio de autocorrelación espacial, el cual mide el grado de relación o dependencia entre las elevaciones cercanas y las distantes. Fue elegido especialmente por su afinidad en los procedimientos de reducción de escala y es un método que procesa rápidamente los datos (esto puede ser algo ventajoso cuando el volumen es muy grande)

Este algoritmo calcula los valores de las celdas por medio de una composición ponderada de los datos de la muestra, el modelo sugiere que el resultado predicho reduce su incidencia en la medida en que aumenta la separación entre el punto a evaluar y los puntos de su entorno. Es así como se acepta que los puntos más cercanos al centroide poseen un mayor peso en el cálculo del valor definitivo de la elevación para dicha celda. Su modelo matemático es:

$$A = \frac{\left(\sum \left(\frac{Z_i}{d^n} \right) \right)}{\sum \left(\frac{1}{d^n} \right)}$$

Donde:

Z: es el valor a interpolar

Z_i: son los valores de elevación de los puntos vecinos

d: distancia entre los puntos vecinos y el punto a predecir

n: es la potencia a la cual se eleva la distancia, y oscila entre 0,5 y 4 (ESRI, 1993)

Para realizar este procedimiento de interpolación se tiene que tomar en cuenta: (1) La definición de la zona circundante del punto a interpolar (delimitación de radio de acción, forma de hacer el re-muestreo y la orientación de los puntos). (2) La cantidad de puntos que se utilicen al interior de la zona circundante. (3) La elección de la función matemática que se ajuste a la variación sobre la cantidad de puntos seleccionados. (4) La función que se use en la ponderación y la cantidad de puntos que se usen como vecinos en el área circundante, son parámetros definitivos en el resultado de la interpolación. (5) La potencia permite controlar la significancia de los puntos conocidos en los valores interpolados basándose en la distancia desde el punto de salida, su valor predeterminado es 2 (ESRI, 2010).

El método de interpolación IDW se realizó con software de código abierto SAGA, a continuación, se describe el flujo de trabajo.

3.3.1.2 Flujo de trabajo en SAGA

SAGA (Sistema Automatizado para el Análisis Geocientífico), es un software de código abierto destinado al ambiente de los sistemas de Información Geográfica y cuya licencia esta principalmente bajo la Licencia Pública General (GNU). Desde el año 2004 este software ha desarrollado herramientas especializadas en el campo del análisis digital de terreno, en una plataforma integral en el modelado científico. Tiene una interfaz gráfica amigable con el usuario, además posee un intérprete de línea de comandos que, a pesar de estar construido sobre C++, puede ejecutar scripts con lenguajes como R y Python.

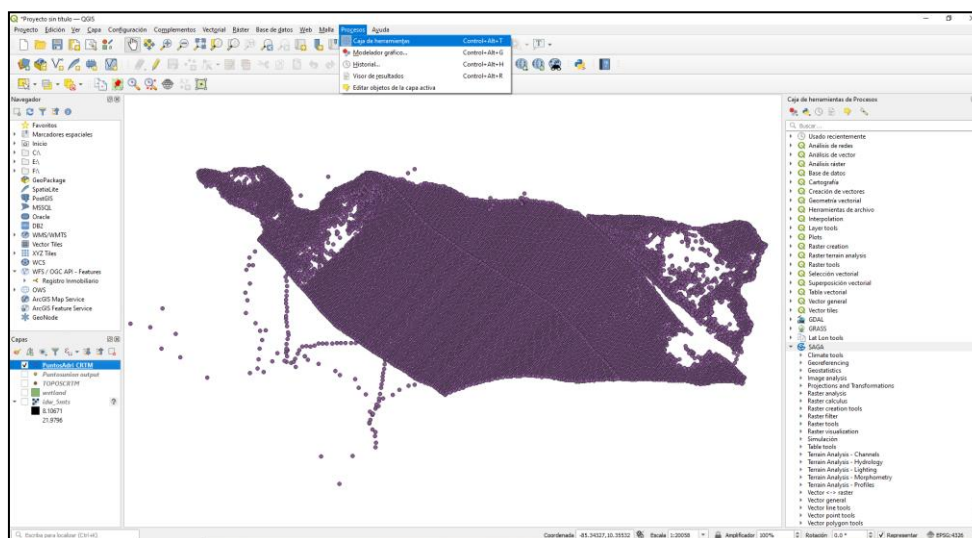


Figura 11. Software QGIS-Interfaz SAGA.

Los puntos del lidar LVIS procesados previamente en QGIS se pasaron a SAGA para su análisis, para iniciar, se debió cargar los archivos shapefiles por medio de la herramienta Load Shapes que se encuentra en File→Shapes→Load, se abrió el cuadro de diálogo correspondiente donde solicita la dirección del directorio en la cual se encontraba alojado el archivo shapefile de puntos, y finalmente dando clic en “Open”. Una vez realizado este paso la capa se añadió al administrador de datos llamado “Data”.

Previamente se utilizó el software QGIS para realizar un preprocesamiento de los puntos vectoriales producto del trabajo lidar LVIS, la capa de información estaba en formato shapefile. Se reproyectaron los insumos dado que se encontraban en UTM zona 16, al sistema de coordenadas proyectadas Costa Rica Transversal de Mercator (CRTM05).

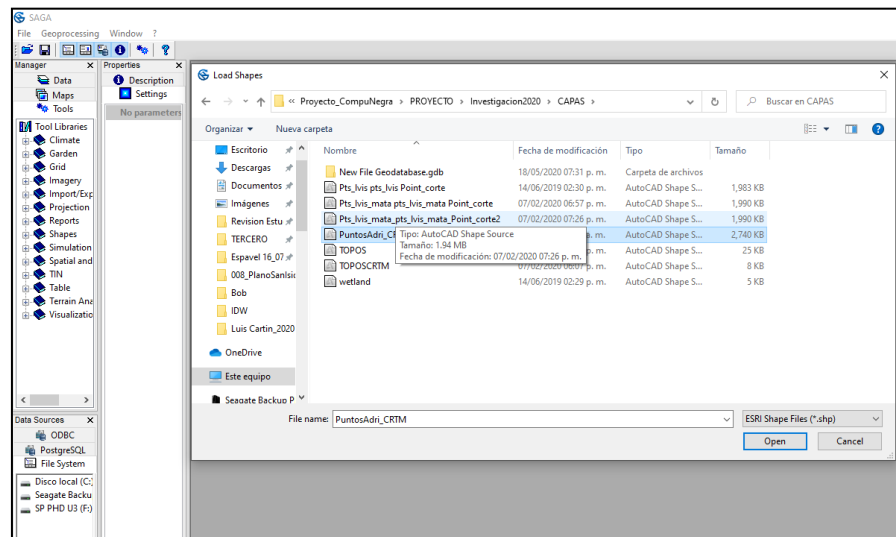


Figura 12. SAGA carga de archivo shape.

A continuación, en “Data” se visualizaron los diferentes shapefiles cargados y en donde encontramos la capa de puntos de elevaciones y se añadió esta capa a un visualizador de mapa por medio Clic derecho→Add to Map. Se abrió automáticamente un cuadro de mapa donde se visualizó la capa de puntos.

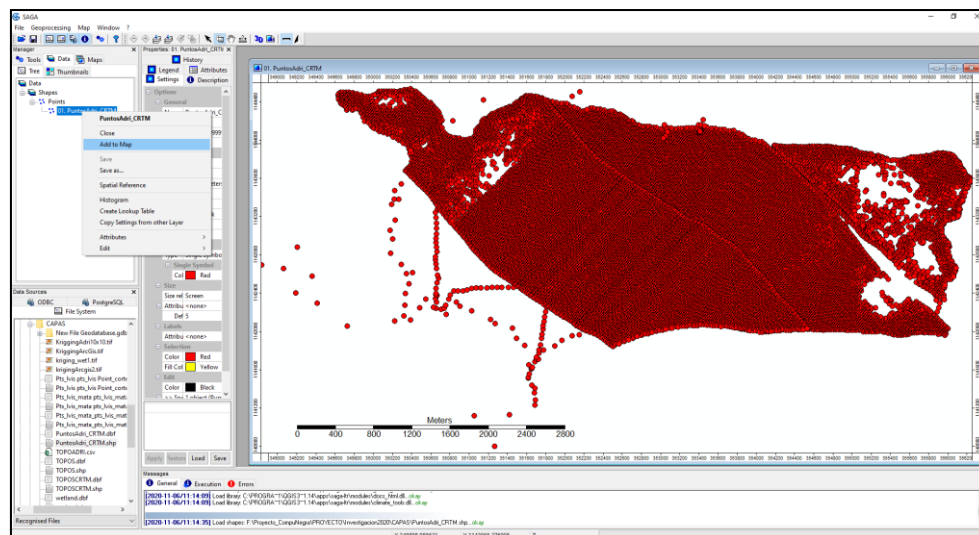


Figura 13. Visualización de la información.

Para proceder con la interpolación de IDW se debió acceder a Geoprocessing→Grid→Gridding→Interpolation from Points→Inverse Distance Weighted donde se desplegó un cuadro de diálogo del proceso de interpolación de IDW.

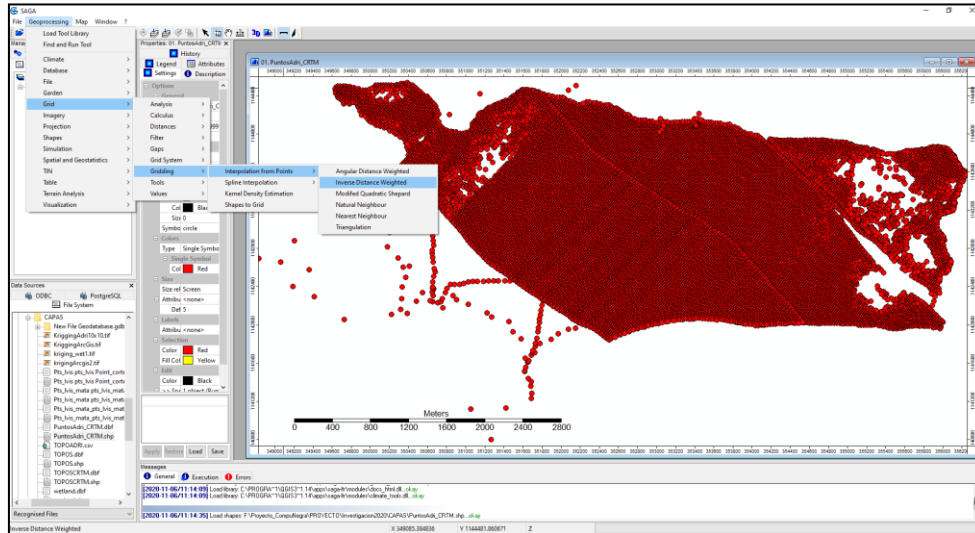


Figura 14. Método de interpolación IDW.

Al seleccionar el método de interpolación se desplegó un cuadro de diálogo donde se debió configurar los siguientes parámetros:

- Shapefiles
 - Points: Se debió seleccionar la capa de puntos con las elevaciones.
 - Attribute: Se debió seleccionar el campo de atributo que se desea interpolar, para efectos de la capa se escoge “Elevaciones”.
- Options
 - Cellsize: En este campo se debió seleccionar el tamaño de celda de salida, se ingresó “5” como tamaño de celda debido a que el terreno es muy plano.
- Search options
 - Search range: Se debió seleccionar el rango de búsqueda, se ingresó “global” para que el algoritmo realizara a partir de un punto la estimación de ubicación de otro punto en un rango de búsqueda en todas direcciones.

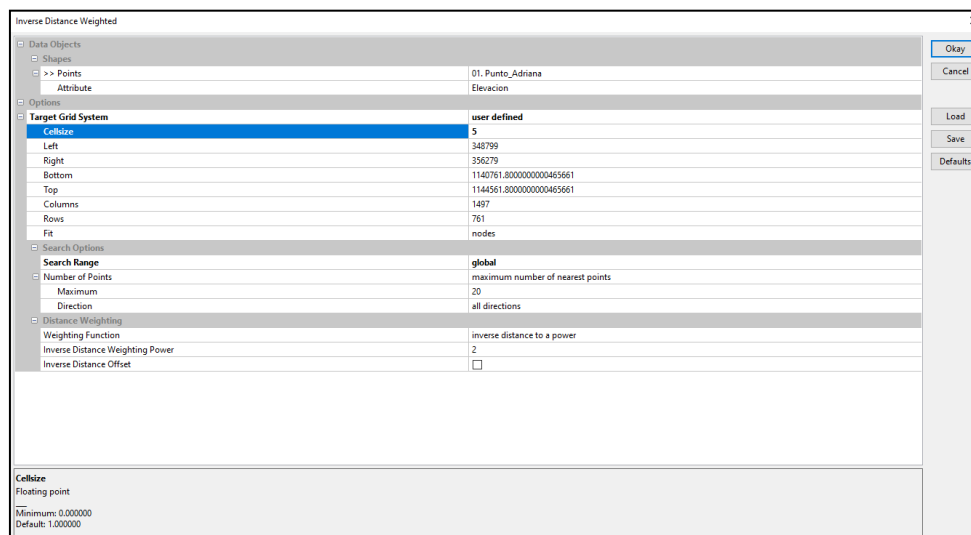


Figura 15. Configuración de parámetros.

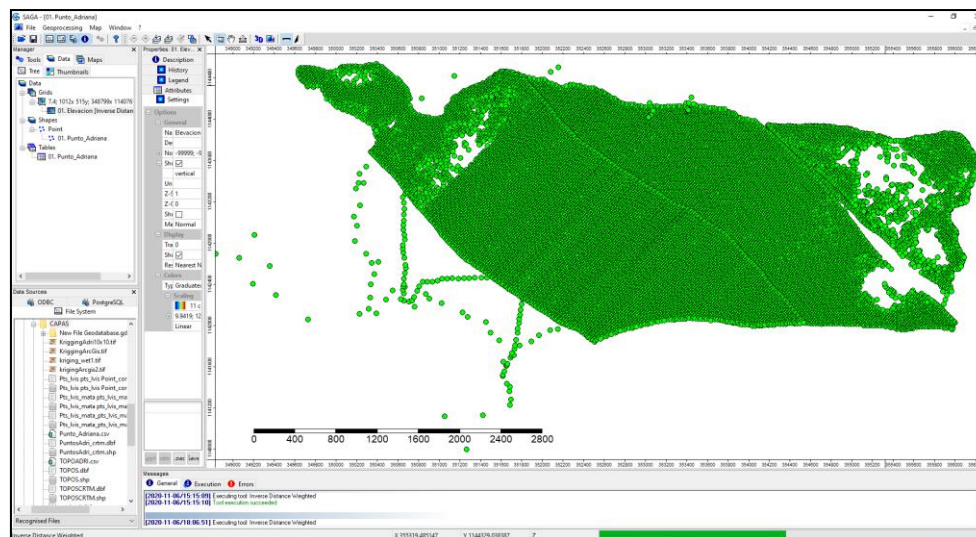


Figura 16. Proceso de interpolación IDW.

El algoritmo comenzó el proceso de interpolación. Cuando el proceso terminó la capa en formato grid se añadió al administrador de datos llamado “Data”. Se añadió esta capa a un visualizador de mapa por medio Clic derecho→Add to Map. Se abrió automáticamente un cuadro de mapa donde se visualizó la capa grid interpolado con el método de IDW a 5 metros de resolución espacial.

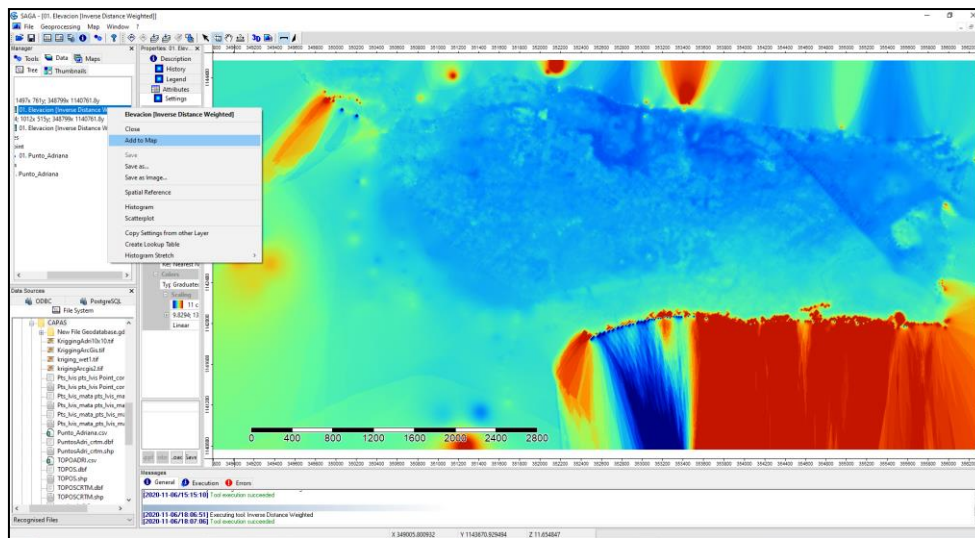


Figura 17. Resultado del proceso de interpolación IDW.

Para exportarlo a un formato ráster compatible con otros softwares de cliente SIG se debió acceder a Geoprocessing→File→Grid→Export→Export GeoTIFF donde se exportó a un archivo GeoTIFF.

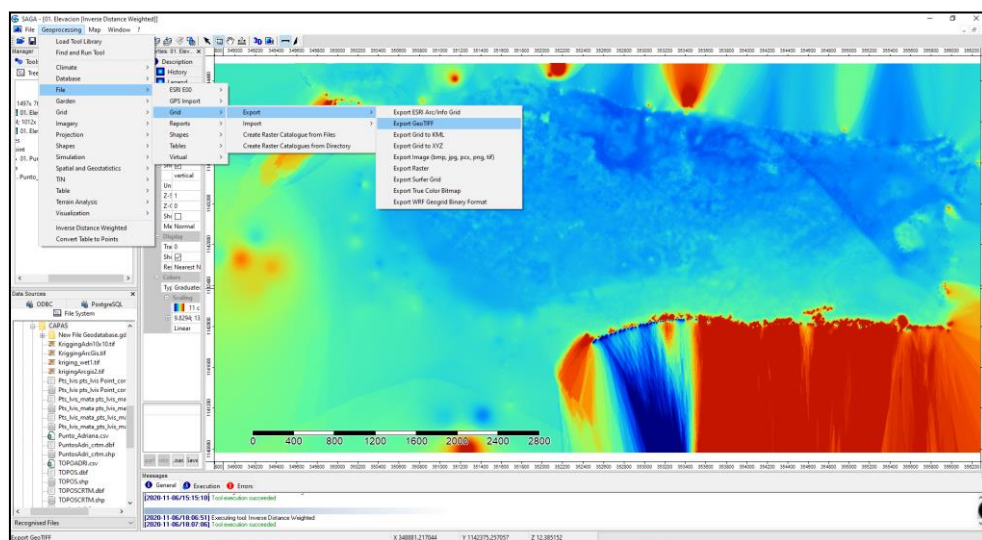


Figura 18. Exportación de la información a formato ráster (parte 1).

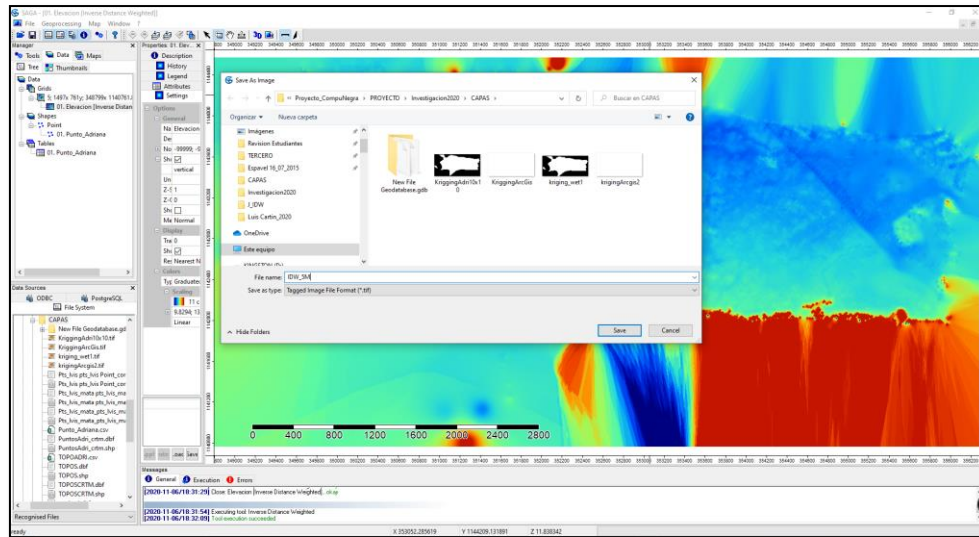


Figura 19. Exportación de la información a formato ráster (parte 2).

En el software QGIS se procedió a abrir el archivo del resultado de la exportación desde SAGA, se incorporó en el “Panel de Capas”. El archivo interpolado se exportó desde SAGA con una forma rectangular y se debió recortar a la forma de la zona de estudio de la laguna. Se procedió a ir al menú Ráster en esta dirección Ráster→Elevación→Cortar ráster por capa de máscara, en el cuadro de diálogo emergente se debió seleccionar como “capa de entrada” el archivo interpolado, como “capa de máscara” el archivo vectorial de los límites de la laguna, se asignó el nombre de salida de la capa ráster resultante y todos los demás parámetros se dejaron por defecto para así correr el algoritmo de corte dando clic en Ejecutar.

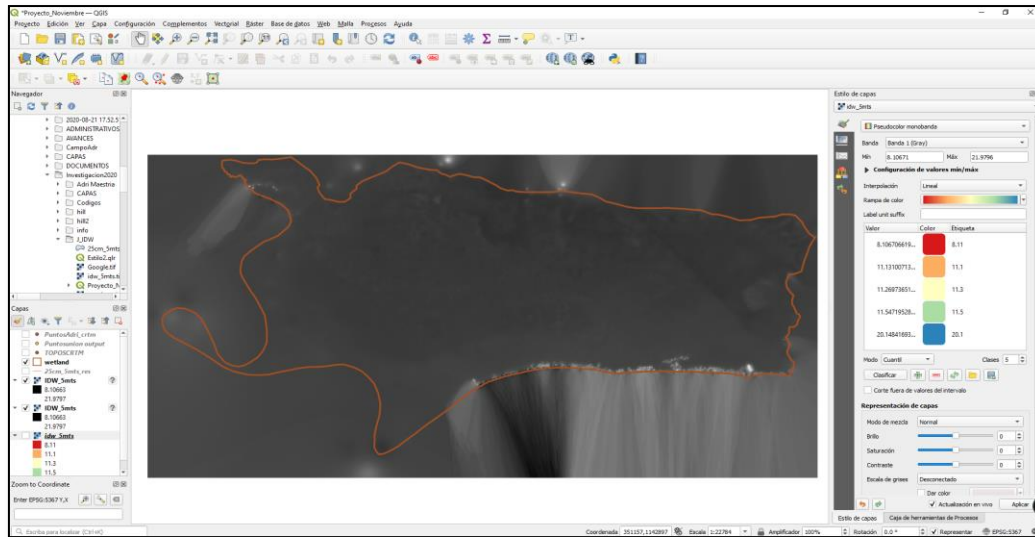


Figura 20. Visualización de la interpolación IDW a 5m de resolución espacial en QGIS.

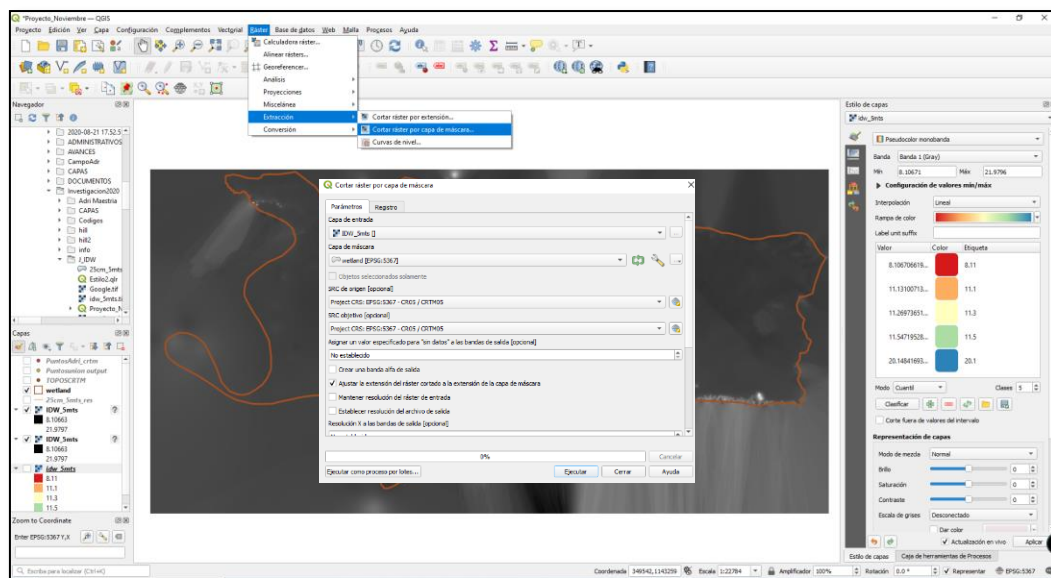


Figura 21. Recorte del área de estudio Laguna Palo Verde.

A continuación, se visualizó la capa ráster interpolada recién recortada, esta capa se representó con una rampa de color en vez del predeterminado que es la rampa de grises, dando clic derecho sobre la capa ráster IDW, se escogió “Propiedades”, en el cuadro de diálogo siguiente se seleccionó “Simbología”. En las opciones de “Band Rendering”, en “Tipo de renderizador” se seleccionó “Pseudocolor monobanda” y en las opciones de

“Configuración de valores min/max” en “Rampa de color” se eligió un color que fuera representativo para los atributos de elevaciones, se conservaron las demás opciones predeterminadas y finalmente se dio clic en “Aplicar” y “Aceptar”.

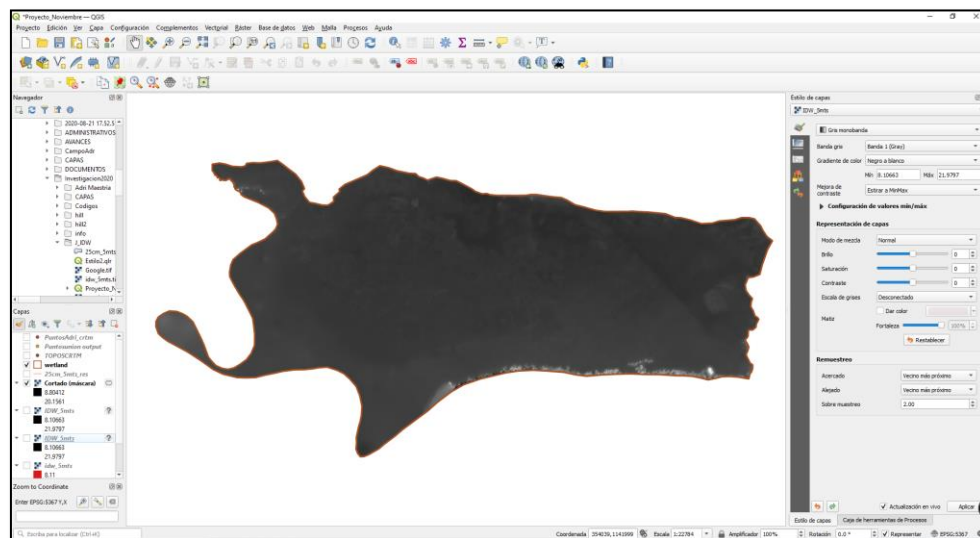


Figura 22. Visualización del área de estudio recortada, Laguna Palo Verde.

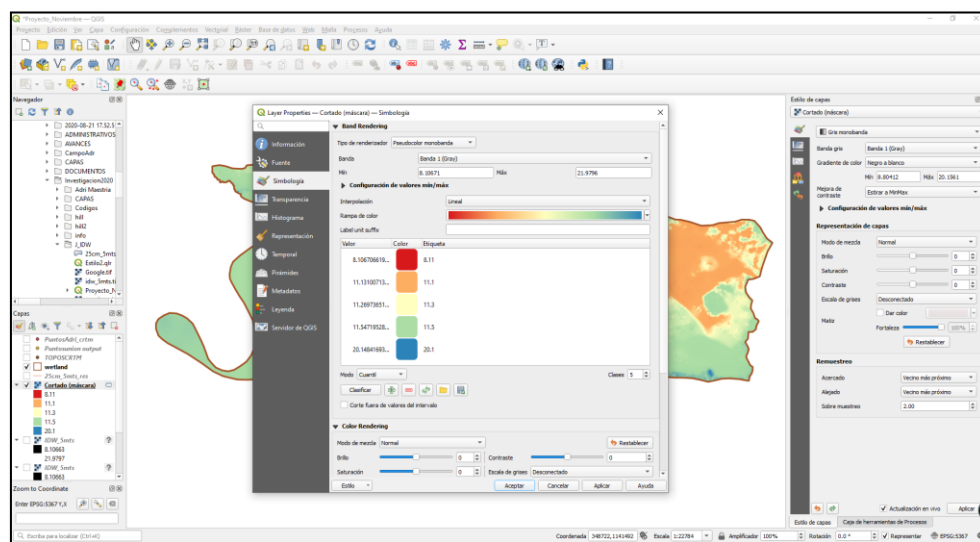


Figura 23. Visualización en rampa de colores del área de estudio recortada, Laguna Palo Verde.

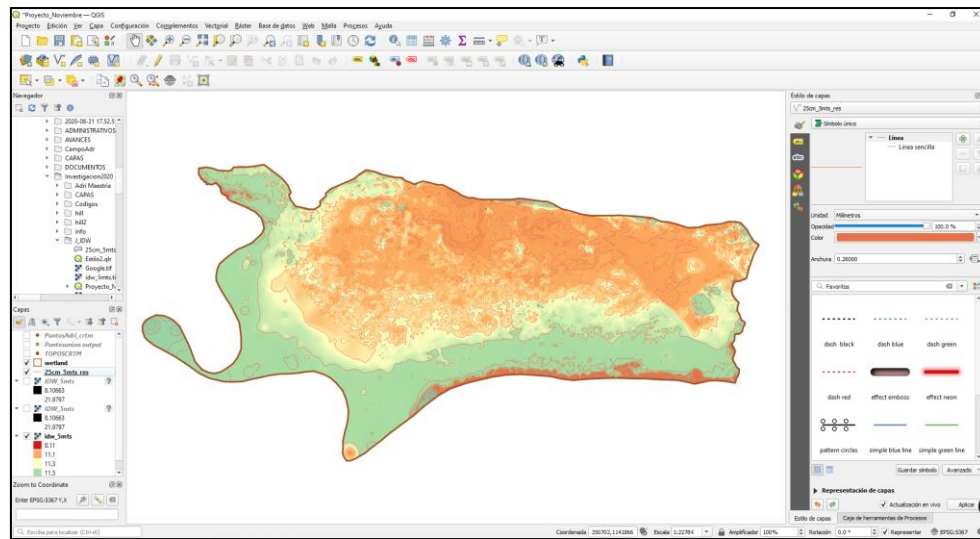


Figura 24. Visualización del modelo con el método de interpolación IDW.

3.3.1.3 Histograma

En el software de código abierto SAGA se generó un histograma que permitió visualizar la distribución de frecuencia en el eje y con respecto a la elevación en el eje x.

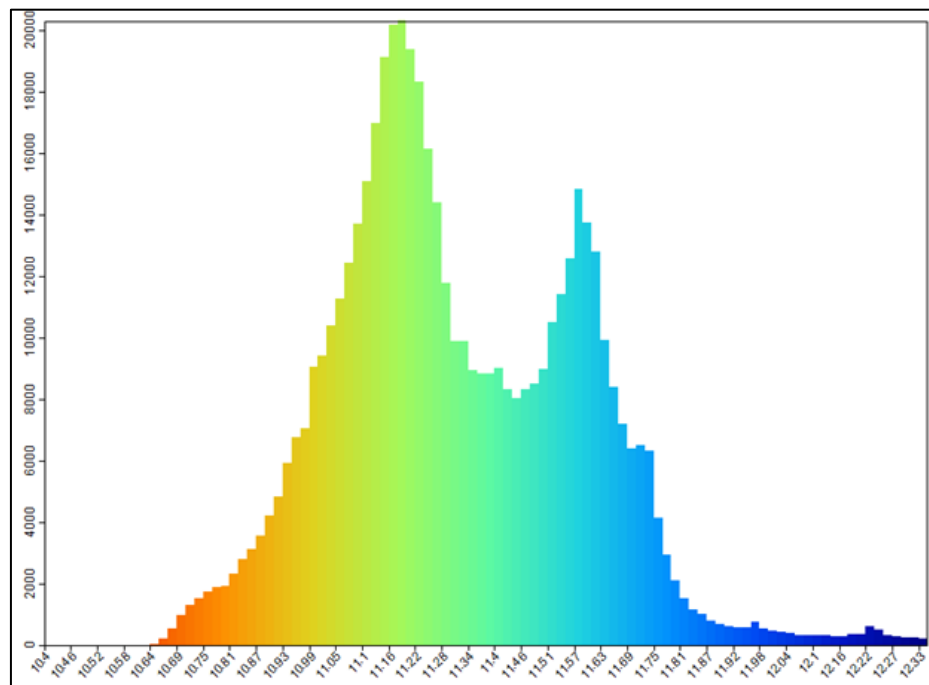


Figura 25. Visualización Histograma SAGA

3.3.1.4 Cálculo del error

De acuerdo a la teoría de errores desarrollada por Gauss, se ha adoptado el Error Medio Cuadrático (RMSE) como el modelo matemático más exigente para calcular el error de un MED, por lo que su uso facilita la comparación de los valores obtenidos; lo que se pretende es establecer y cuantificar las diferencias más significativas encontradas entre la aplicación de estos algoritmos usados para la modelación de superficies.

$$RMSE_{elev} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_p - Z_o)^2}{n - 1}}$$

Para el cálculo del RMSE el procedimiento a seguir desde el punto de vista teórico fue: (1) se calculó, para cada punto de control, la diferencia altimétrica existente entre el modelo interpolado y su correspondiente posición con el dato de elevación original del MED. (2) se elevaron dichos residuos al cuadrado para eliminar el valor del signo. (3) se obtuvo el promedio de las diferencias para todo el conjunto de puntos de control. (4) se estimó la raíz cuadrada de dicho promedio obteniendo el RMSE.

El resultado fue la cobertura puntual que contiene los registros que sirven para caracterizar los modelos del área de estudio en función de su EMC. El proceso anterior se realizó en una hoja de cálculo del software Excel.

Del MED se extrajeron los valores de elevación interpolados con una resolución de 5 metros, con lo cual se obtuvo el resultado del valor interpolado para poder compararlo con el valor original de la muestra, los datos levantados en sitio con tecnología GNSS.

Tabla 5. Datos del calculo EMC

Nombre	Este	Norte	Elevación Medidas	Elevación IDW	Diferencia
BAC1	353415,9909	1144089,0760	12,9500	12,7548	0,1952
EM1	353409,3579	1144086,7090	12,9591	12,9548	0,0043
PN-31879	349724,4474	1142054,7330	11,9800	11,9800	0,0000
PN-31875	349058,5122	1142653,3280	13,2500	13,2498	0,0002

HITO-2	350384,4900	1143893,3900	12,7100	12,6901	0,0199
DR-3	350393,9200	1143871,7100	12,6260	12,4449	0,1811
MUELLE-01	353066,6900	1144085,7700	11,3500	11,1160	0,2340
MUELLE-04	353047,0200	1144042,1400	11,7500	11,5558	0,1942
MUELLE-05	353023,3000	1144023,2000	12,6500	12,3596	0,2904
PN-01	353024,4200	1144023,1200	12,6560	12,3596	0,2964
MUELLE-06	353025,2900	1144022,0300	12,3750	12,3596	0,0154
PN-24	353401,8400	1144106,5900	12,4450	12,3801	0,0649
PN-25	353406,3800	1144107,8600	12,9210	12,7801	0,1409
PN-26	353407,9500	1144107,8700	12,3460	12,4236	-0,0776
ANCLA-01	353402,4700	1144103,1100	12,7060	12,6115	0,0945
CLAVO-20	353408,3000	1144103,3100	12,8700	12,7133	0,1567
ANCLA-02	353413,1900	1144104,0800	12,7330	12,4847	0,2483
ANTENA-01	353407,8900	1144100,2700	12,9360	12,7133	0,2227
ANCLA-03	353408,5200	1144094,3700	13,1920	12,9761	0,2159
PLANCHE-04	353407,4810	1144093,5300	12,9970	13,1171	-0,1201
PLANCHE-03	353407,6700	1144091,3900	13,0020	13,1171	-0,1151
PLANCHE-01	353409,6400	1144093,8000	13,0010	13,1171	-0,1161
PLANCHE-02	353409,8600	1144091,6500	12,9910	13,1171	-0,1261
HITO-1	353408,9300	1144089,9000	12,9590	13,1171	-0,1581
PN-52	353406,2500	1144082,7600	12,4290	12,4618	-0,0328
PN-51	353409,3900	1144083,2700	12,7060	12,5745	0,1315
PN-50	353414,0800	1144084,3700	12,4320	12,7548	-0,3228

Una vez construido el MED final se reportó su precisión, y se realizó la estimación del volumen de agua requerida para inundar el humedal de la Laguna Palo Verde, y con esto cuantificar la cantidad de recurso hídrico que eventualmente se requeriría para llevar a cabo esta actividad como una práctica para el manejo y control de la planta invasora *Typha dominguensis*.

3.3.2. Clasificar la cobertura de la tierra específicamente en la Laguna Palo Verde del Parque Nacional Palo Verde mediante técnicas convencionales y/o de aplicación de datos de sensores remotos y software de acceso libre.

3.3.2.1 Descarga de datos:

- 1) Se procedió a descargar las escenas del sensor Sentinel-2 de acuerdo con lo señalado previamente en la Tabla 3 del apartado “Instrumentos e insumos”, para esto se utilizó la aplicación de la USGS llamada Glovis, la cual se accedió mediante la siguiente página Web <https://glovis.usgs.gov/app>, y en la cual fue necesario crear un usuario y contraseña para poder descargar cualquier recurso.
- 2) Una vez dentro de la aplicación Glovis se definió la ubicación geográfica de interés y se estableció un filtro de búsqueda centrado en imágenes del sensor Sentinel-2, con un rango de cobertura de nubes (Cloud Cover) de 0-20%.
- 3) Bajo estos criterios de búsqueda se procedió a seleccionar una escena para época seca (marzo) y otra para época lluviosa (octubre) del año 2020.
- 4) Una vez que fueron seleccionadas las escenas se eligió la opción de descarga masiva, para lo cual la aplicación Glovis procede a crear un número de orden y a facilitar la descarga mediante un software adicional denominado BDA, el cual se descargó por medio del siguiente link <https://earthexplorer.usgs.gov/bulk/>.
- 5) Se revisó el metadato de las escenas descargadas obteniéndose que *“La asociación entre la ESA y el USGS permite la distribución de los datos de reflectancia de la parte superior de la atmósfera (TOA) de nivel 1C. El procesamiento de nivel 1C incluye correcciones radiométricas y geométricas junto con ortorrectificación para generar productos geolocalizados de alta precisión, y con niveles de reflectancia por encima de la atmósfera (Top of the atmosphere: TOA: Por encima de la atmósfera)”* (ESA Sentinel Online (b), s.f. y ESA Sentinel Online (c), s.f.). Por tanto, como único pre procesamiento se hizo corrección atmosférica para poder contar con un producto de reflectancia de la superficie (Below of the atmosphere: BOA: Por debajo de la

atmósfera) y con este poder realizar análisis cuantitativo y cálculo de índices de vegetación.

- 6) Cada escena viene contenida en una carpeta individual, dentro de la cual existe un archivo de Metadato en formato XML denominado MTD_MSI, así como también una subcarpeta denominada “*GRANULE / Nombre del archivo / IMG_DATA*” dentro de la cual aparecen los archivos para cada una de las bandas del sensor, (1 a la 8, 8a, 9 a la 12 y una imagen de color verdadero (TCI)), lo anterior de acuerdo con la Tabla 6.

Tabla 6. Resolución radiométrica de escenas Sentinel 2

Bandas Sentinel-2	Sensor Sentinel-2A		Sensor Sentinel-2B		Resolución espacial (m)
	Longitud de onda central (nm)	Ancho de banda (nm)	Longitud de onda central (nm)	Ancho de banda (nm)	
Band 1 – Coastal aerosol	442,7	21	442,2	21	60
Band 2 – Blue	492,4	66	492,1	66	10
Band 3 – Green	559,8	36	559,0	36	10
Band 4 – Red	664,6	31	664,9	31	10
Band 5 – Vegetation red edge	704,1	15	703,8	16	20
Band 6 – Vegetation red edge	740,5	15	739,1	15	20
Band 7 – Vegetation red edge	782,8	20	779,7	20	20
Band 8 – NIR	832,8	106	832,9	106	10
Band 8A – Narrow NIR	864,7	21	864,0	22	20
Band 9 – Water vapour	945,1	20	943,2	21	60
Band 10 – SWIR – Cirrus	1373,5	31	1376,9	30	60
Band 11 – SWIR	1613,7	91	1610,4	94	20

Band 12 – SWIR	2202,4	175	2185,7	185	20
TCI (True color images)	RGB	Composición	RGB	Composición	10

Fuente: (ESA Sentinel Online (d), s.f.)

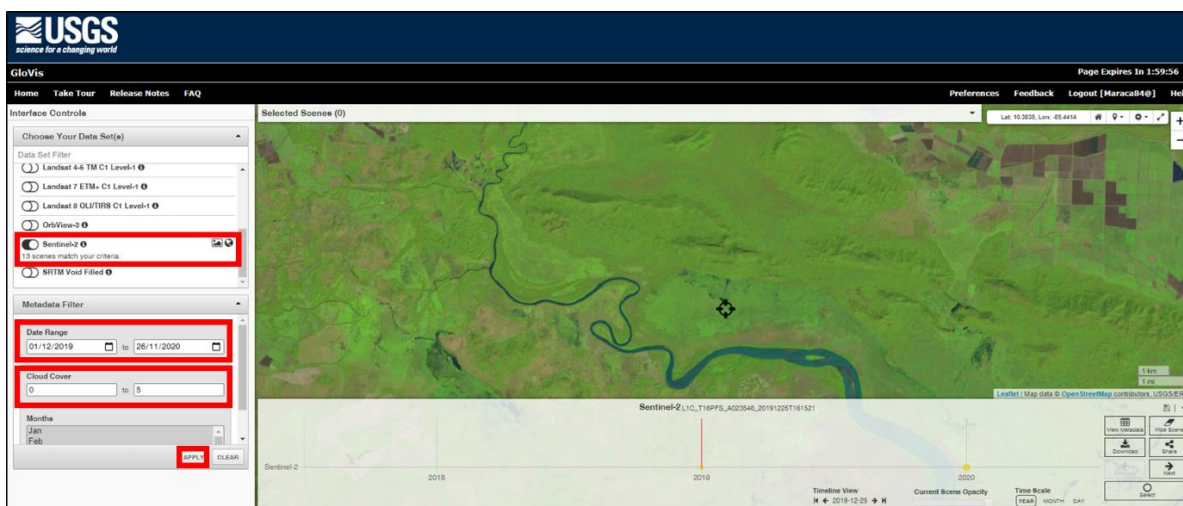


Figura 26. Ventana para la selección de escenas de Glovis-USGS.

3.3.2.2 Recorte de la escena y corrección atmosférica:

- 7) A efectos de optimizar los recursos computacionales y dado que cada una de las escenas abarcaban toda la provincia de Guanacaste y Península de Nicoya, se recortaron a la región de interés con la herramienta “*Caja de herramientas de procesos / GDAL / Extracción ráster / Cortar ráster por capa de máscara*”, seleccionando la opción de “*Ejecutar como proceso por lotes*”. Como **capas de entrada** se seleccionaron las bandas 2, 3, 4, 8 y 11 de cada escena, y como **capa de máscara** se creó un polígono de mayor extensión respecto al polígono del humedal de la Laguna Palo Verde llamada “mascara_corte.shp”. Como **SRC de origen** se seleccionó el EPSG 32616 (WGS84 / UTM Zone 16N) ya que corresponde al sistema de proyección de las escenas, así como de la capa de máscara. Como **SRC objetivo** se seleccionó EPSG 5367 (CR05 / CRTM05).

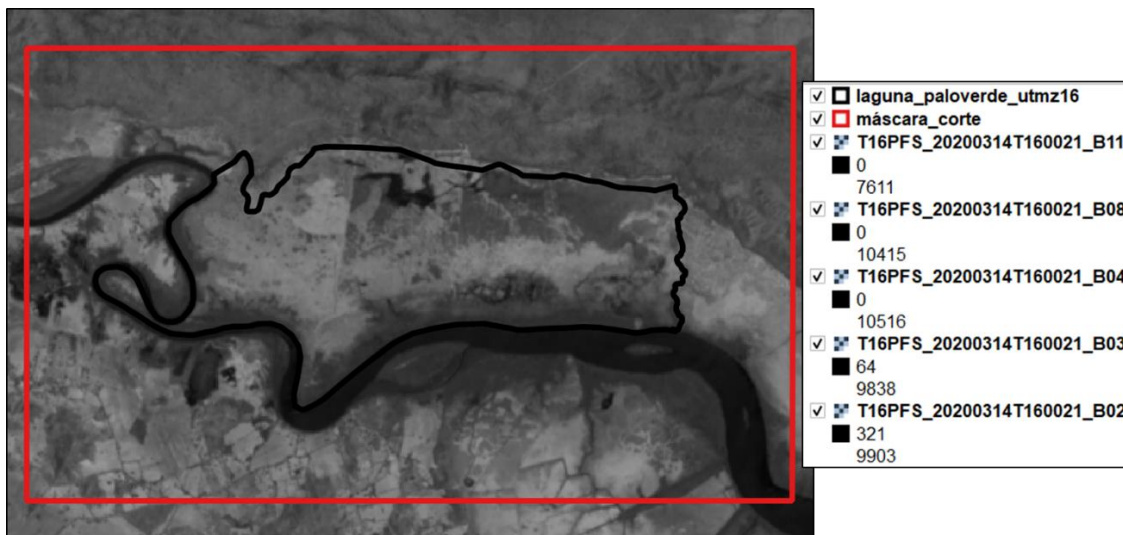


Figura 27. En rojo se observa la máscara de corte utilizada para recortar las escenas, en borde negro se muestra el perímetro de la Laguna Palo Verde, la imagen base corresponde a escena de Sentinel-2 para el 14 de marzo del 2020.

- 8) Se realizó una corrección atmosférica de las bandas previamente recortadas utilizando el complemento para QGIS Semi-Automatic Classification Plugin, Menú Preprocesamiento, Sensor Sentinel-2. Fue seleccionada la función “*Aplicar la corrección atmosférica DOS1*”, siendo que dicha ventana se configuró de la siguiente forma (Figura 28). Las bandas corregidas 4 y 8 más adelante fueron utilizadas para calcular el índice de vegetación denominado “Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada” (NDVI). Mientras que las bandas corregidas 2, 3, 8 y 11 fueron utilizadas para crear las composiciones de bandas 8-11-2 (para realzar los espejos de agua) y 8-4-3 (para realzar la vegetación) y con base a estas dos composiciones seleccionar para cada fecha específica la que mejor discrimine diferentes clases de cobertura y con base a la combinación seleccionada llevar a cabo un proceso de clasificación supervisada que se detallará adelante. La corrección atmosférica permitió pasar las bandas de niveles digitales (ND) a valores de reflectancia por debajo de la atmósfera.

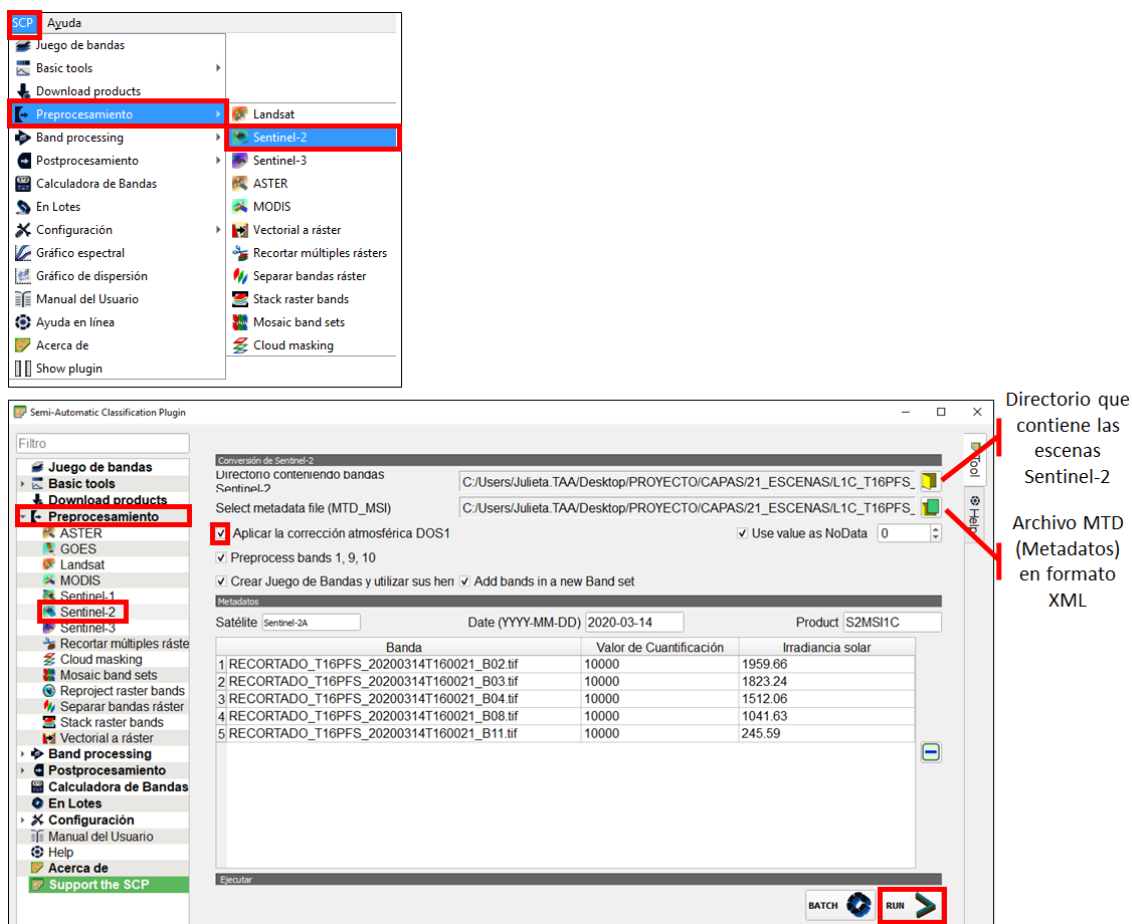


Figura 28. Configuración de herramienta preprocesamiento de Semi-Automatic Classification Plugin de QGIS para corrección atmosférica.

3.3.2.3 Cálculo de índice de vegetación NDVI:

- 9) Tal y como se indicó previamente fueron seleccionadas las bandas 4 (rojo) y la banda 8 (Infrarrojo cercano) a efectos de calcular el NDVI. Para esto fueron utilizadas las imágenes previamente recortadas y corregidas atmosféricamente.

De acuerdo con Environmental Systems Research Institute (2016): “El índice diferencial de vegetación normalizado (NDVI) es un índice normalizado que le permite generar una imagen que muestra el verdor (la biomasa relativa). Este índice aprovecha el contraste de las características de dos bandas de un dataset ráster multiespectral: las absorciones de pigmento de clorofila en la banda roja y la alta reflectividad de los materiales de las plantas en la banda cercana al infrarrojo (NIR).”

Este índice genera valores teóricos entre -1,0 y 1,0 que básicamente representan el verdor y donde cualquier valor negativo corresponde principalmente a las nubes, el agua y la nieve y los valores cercanos a cero corresponden principalmente a las rocas y al terreno desnudo. Los valores muy bajos de NDVI (por debajo de 0,1) corresponden a áreas yermas de rocas, arena o nieve. Los valores moderados representan terrenos con arbustos y prados (0,2 a 0,3), mientras que los valores altos indican bosques de zonas templadas y tropicales (0,6 a 0,8) (Environmental Systems Research Institute, 2016).

- 10) Se calculó el NDVI utilizando la calculadora ráster de QGIS. La ecuación del NDVI documentada y predeterminada es la siguiente (ver Figura 29):

$$NDVI = \frac{(Banda\ NIR - Banda\ R)}{(Banda\ NIR + Banda\ R)}$$

Donde:

NIR = valores de píxel de la banda infrarroja = Banda 8

R = valores de píxel de la banda roja = Banda 4

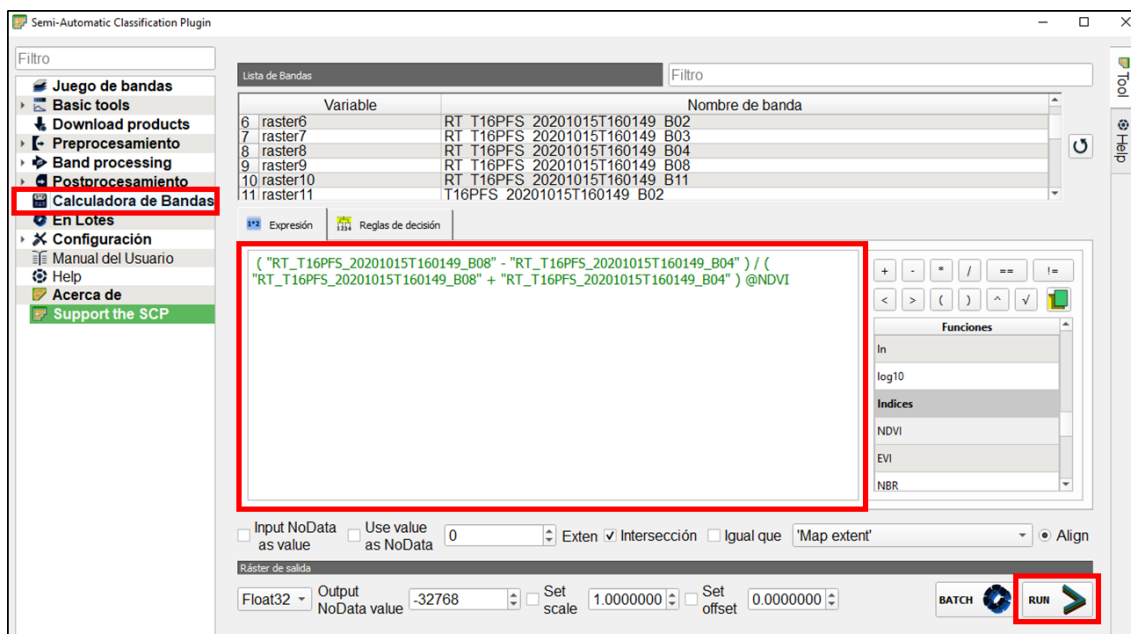


Figura 29. Cálculo de NDVI utilizando la calculadora de bandas del complemento Semi-Automatic Classification Plugin.

3.3.2.4 Combinaciones de bandas:

- 11) Tal y como se mencionó anteriormente, las bandas corregidas 2, 3, 8 y 11 fueron utilizadas para crear las composiciones de bandas 11-8-2 (para realzar los espejos de agua) y 8-4-3 (para realzar la vegetación) y con base a éstas seleccionar para cada fecha específica la que mejor discriminara espejos de agua y diferentes clases de cobertura. Con base en a estas combinaciones y el resultado del NDVI del paso anterior se llevó a cabo un proceso de clasificación supervisada que se detallará más adelante.
- 12) Para realizar la combinación de bandas se utilizó la herramienta “Semi-Automatic Classification Plugin” / Juego de bandas y se procedio a seleccionar las bandas de la combinación en el orden adecuado, adicionalmente se seleccionó el sensor utilizado en la pestaña de “Wavelength quick settings” y que para este caso fue Sentinel-2, y la fecha de la imagen.

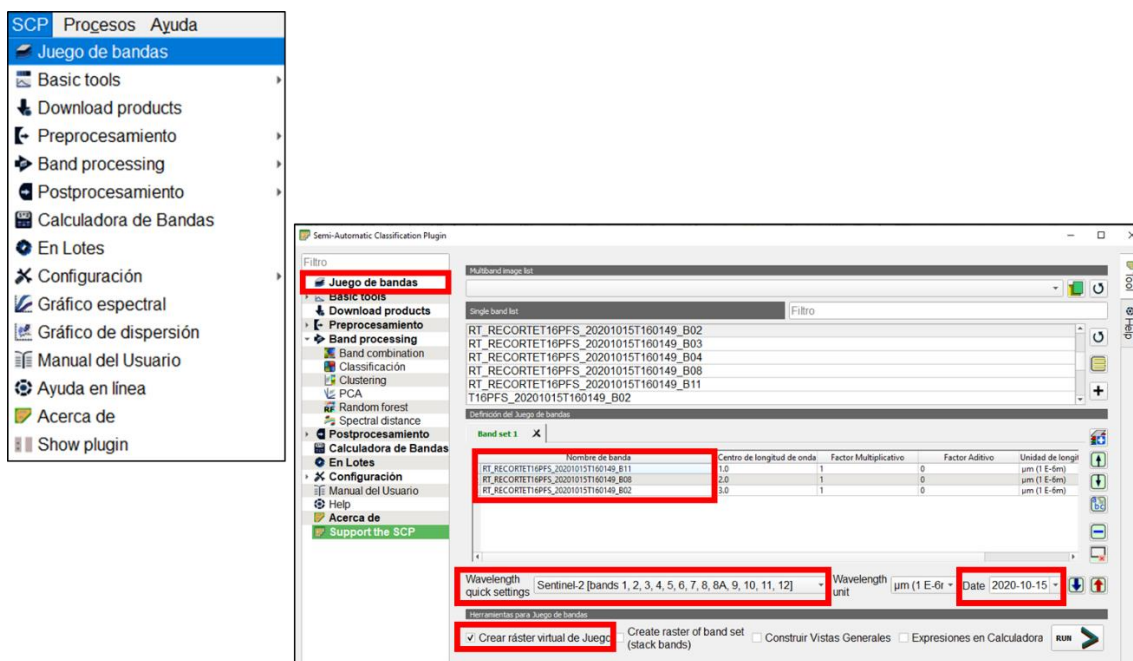


Figura 30. Configuración de ventana en QGIS para la construcción de un juego de bandas.

A continuación, se describe brevemente cada una de las combinaciones empleadas:

- 11-8-2: esta combinación pasa por el canal rojo la banda infrarroja (SWIR1) la cual permite observar elementos como humedad del suelo y vegetación. Pasa por el canal verde la banda infrarroja cercana (NIR) la cual sirve para separar costas de la vegetación. Por el canal azul se pasa la banda azul (BLUE) asociada con agua profunda. Se observan diferentes tonalidades de verde y moteados color café, más asociados a estrés hídrico o senescencia.

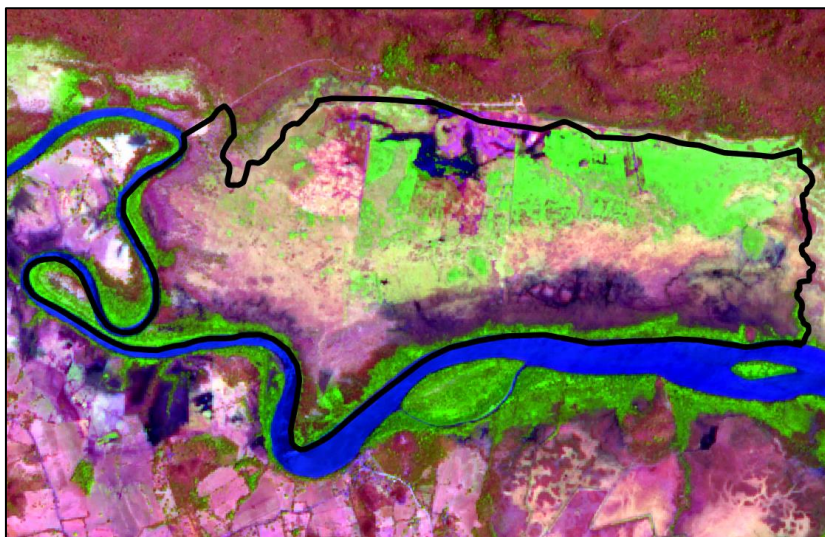


Figura 31. Combinación de bandas 11-8-2 para realzar los espejos de agua, en escena Sentinel-2 del 14 de marzo del 2020 en Laguna Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica.

- 8-4-3: pasa por el canal rojo la banda del infrarrojo cercano (NIR), la cual se utiliza para detectar costas y vegetación. De acuerdo con Martínez Barbáchano (s.f), *“la vegetación es un caso particular, pues tiene un comportamiento muy cromático. Posee valores bajos de reflectividad en el espectro visible (de 0,4 a 0,7 μm) pero suben en el infrarrojo próximo”*. Es por lo anterior que todo aquello que se caracteriza por ser vegetación se observa de color rojo en esta combinación. Además permite separar muy bien el área de costa (agua) del área con vegetación. Se observan diferentes tonalidades de rojo y los suelos varían de marrón oscuro (también zonas quemadas) a marrón claro. Esta es una combinación de banda muy popular y es útil para estudios de vegetación, monitoreo de drenaje y patrones de suelo y varias etapas de crecimiento de cultivos. Pasa por el canal verde la banda roja (RED) y por el canal azul la banda verde (GREEN).

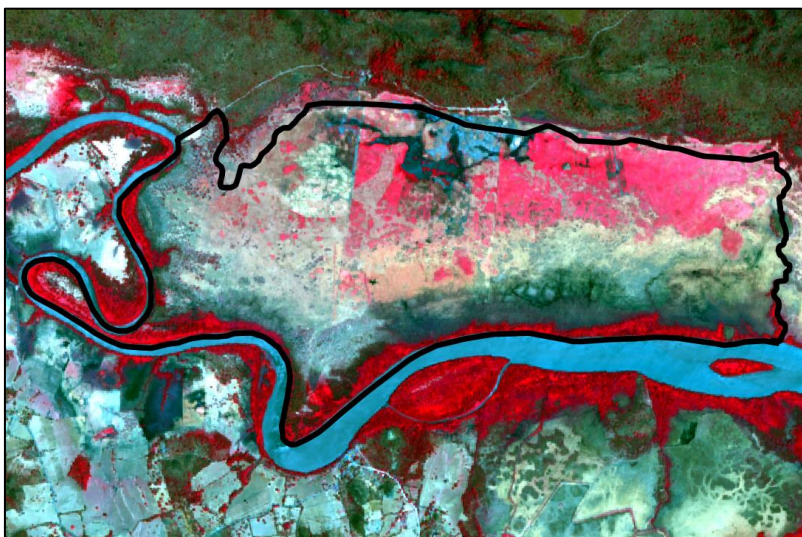


Figura 32. Combinación de bandas 8-4-3 para realzar vegetación, en escena Sentinel-2 del 14 de marzo del 2020 en Laguna Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica.

3.3.2.5 Clasificación Supervisada con Semi-Automatic Classification (SCP) de QGIS para imágenes Sentinel-2.

- 13) Previo a realizar la clasificación supervisada y para efectos de facilitar la creación de las regiones de interés para la clasificación (ROIs), se creó una malla de puntos distribuidos de forma sistemática cada 300 metros, con arranque a los 100 metros en la esquina superior izquierda. Esta malla se creó utilizando la herramienta de QGIS *“Caja de Herramientas de Procesos/Creación de Vectores/Puntos regulares”*. Bajo las condiciones indicadas se creó una malla regular de 264 puntos (ver Figura 33).
- 14) Utilizando la herramienta de QGIS *“Caja de Herramientas de Procesos/Superposición vectorial/Cortar”*. Bajo las condiciones indicadas, se delimito la malla de puntos exclusivamente para la zona de estudio y se recortó la malla regular a 146 puntos (ver Figura 33).

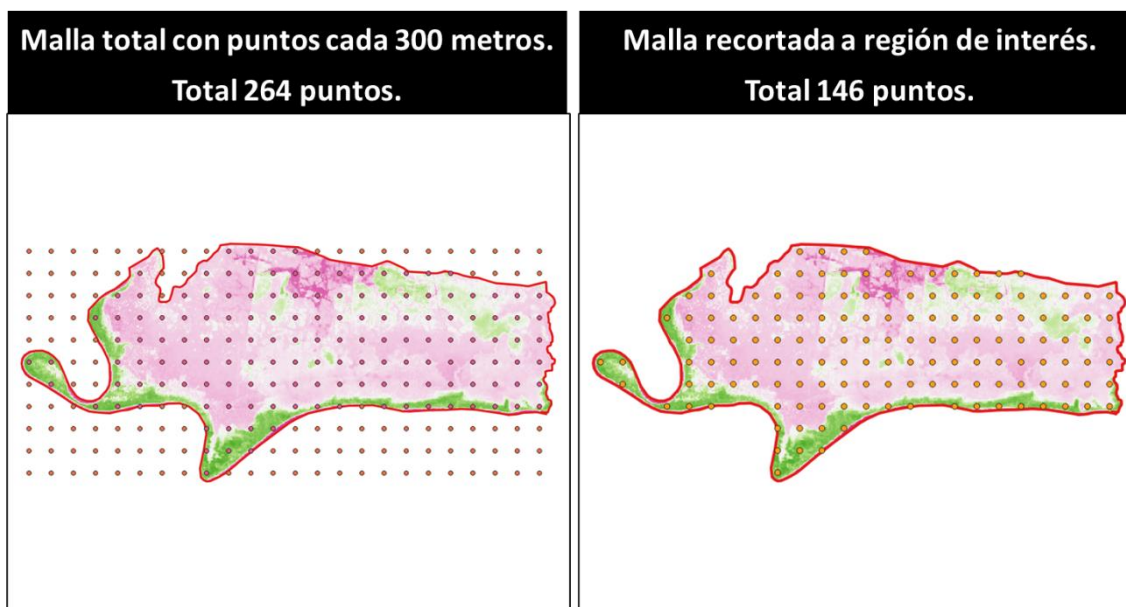


Figura 33. Malla de puntos regulares utilizada para el cálculo de áreas o regiones de interés (ROIs), Laguna Palo Verde, Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica.

- 15) Mediante la tabla de atributos se transformaron todos los valores de ID (identificador), de la malla recortada, a valor de uno (1), mediante el siguiente procedimiento *Abrir tabla de atributos de la capa malla recortada / Calculadora de campos / Actualizar campo existente (=id)* y en expresión se escribió el valor de 1.

- 16) Se rasterizó la capa de malla recortada con la herramienta de QGIS “*Caja de Herramientas de Procesos/GDAL/Conversión vectorial/Rasterizar (vectorial a ráster)*”, con “*capa de entrada*” la malla recortada, el “*campo a usar para un valor de marcado*” la columna id y la resolución ancho/alto y horizontal/vertical definida en 10 unidades georreferenciadas.

El objetivo de rasterizar la malla de puntos recortada fue la de contar con un archivo en formato ráster donde cada punto tiene un valor de uno. De esta forma, una vez que cada una de las escenas por fecha tuviera calculado el valor de NDVI, esta malla ráster de valor uno, se utilizó para multiplicarla con el ráster que contiene los valores del NDVI utilizando la herramienta *Ráster/Calculadora ráster* y de esta forma conocer el valor de NDVI para cada punto y usar esto como valores de referencia

para clasificar el área donde se ubican los puntos como regiones de interés (ROIs) de acuerdo con las siguientes clases de la Tabla 7.

De acuerdo con la Tabla 7, los rangos se calcularon de forma continua y para la designación de clases se utilizó de referencia lo indicado anteriormente por Environmental Systems Research Institute (2016), según lo cual el NDVI genera valores entre -1,0 y 1,0, siendo que cualquier valor negativo corresponde principalmente a las nubes, el agua y la nieve, valores cercanos a cero corresponden principalmente a las rocas y al terreno desnudo. Los valores moderados representan terrenos con arbustos y prados (0,2 a 0,3), mientras que los valores altos indican bosques de zonas templadas y tropicales (0,6 a 0,8).

- 17) Una vez que se tuvo la malla rasterizada con cada uno de los valores de NDVI asignados, mediante la herramienta *Creación de vectores/Píxeles ráster a puntos* se procedió a vectorizar la capa tal y como se muestra en la Figura 34.

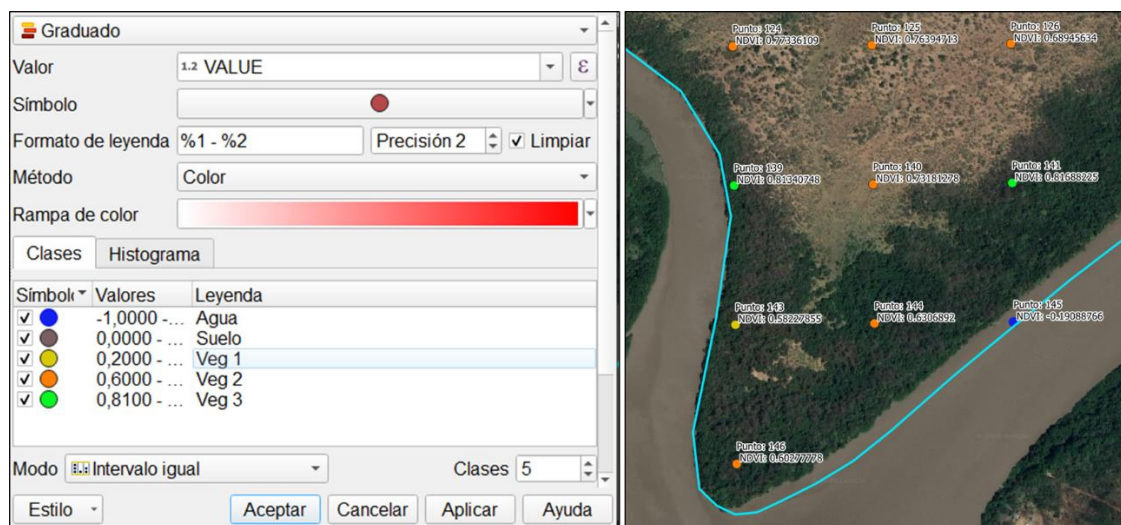


Figura 34. Malla de puntos con valor de NDVI asignado en imagen Sentinel-2 del 15 de octubre del 2020, Laguna Palo Verde, Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica.

- 18) Desde QGIS, utilizando el panel *SCP Dock* del complemento *Semi-Automatic Classification Plugin*, en el menú *“Training input”* procedimos a *“Crear un nuevo entrenamiento de entrada”* el cual se denominó *Clases* (ver Figura 35).

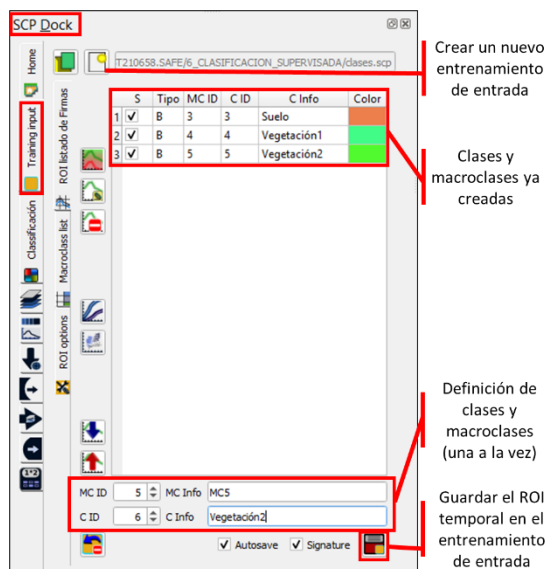
19) En la ventana de la opción *“Training input”* se definieron las macro clases y clases con base a la información que se presenta en la Tabla 7 (ver Figura 35).

Tabla 7. Rango de NDVI, clasificación por clases y definición de los identificadores de macro clases y clases.

Rango		Clase	Macroclases ID	Clases ID
-1,00	-0,01	Agua, nubes	1	1
0,00	0,19	Rocas, suelo desnudo	2	2
0,20	0,59	Vegetación 1 (herbácea, menos densa)	3	3
0,60	0,80	Vegetación 2 (herbácea, más densa)	3	4
0,81	1,00	Vegetación 3 (bosques)	3	5

20) Para crear las áreas de entrenamiento de las clases, en la barra de herramientas SCP se seleccionó la opción de *“Activar el puntero ROI”* y se dio clic en los puntos de acuerdo con los valores de rango y clase definidos en la Tabla 7.

21) Luego se procedió a previsualizar los resultados de la clasificación, por medio de la herramienta *“Activar el puntero para clasificación preliminar”*. Una vez validada la clasificación preliminar, en la pestaña *“Clasificación”* se generó un ráster reclasificado en el cual se activó las opciones de *“Crear vector”* y *“Reporte de clasificación”*, se utilizó como algoritmo de cálculo *“Distancia mínima”* (Figura 35).



Activar el puntero ROI

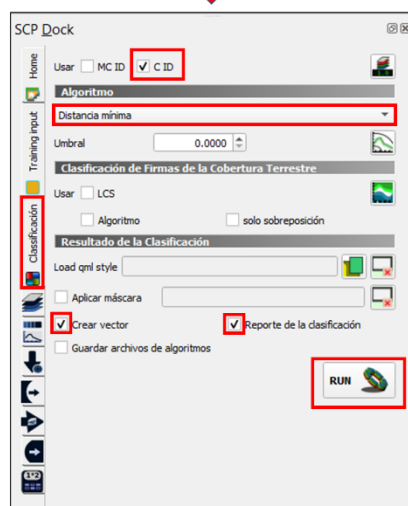


Figura 35. Pasos para la creación de las áreas de entrenamiento y la clasificación supervisada con SCP de QGIS.

22) Finalmente, el complemento SCP generó un archivo shapefile con el resultado de la clasificación, así como un archivo .csv con el reporte o resumen de los valores de área obtenidos para cada clase.

23) Se repitió todo el procedimiento para el total de las escenas según la Tabla 3 y se tabularon los reportes para la clasificación de cada una de las fechas.

24) En la Figura 36 se muestra un resumen de cómo se realizó la clasificación Supervisada con Semi-Automatic Classification (SCP) de QGIS para imágenes Sentinel-2 utilizando el complemento Semi-Automatic Classification Plugin (SCP).

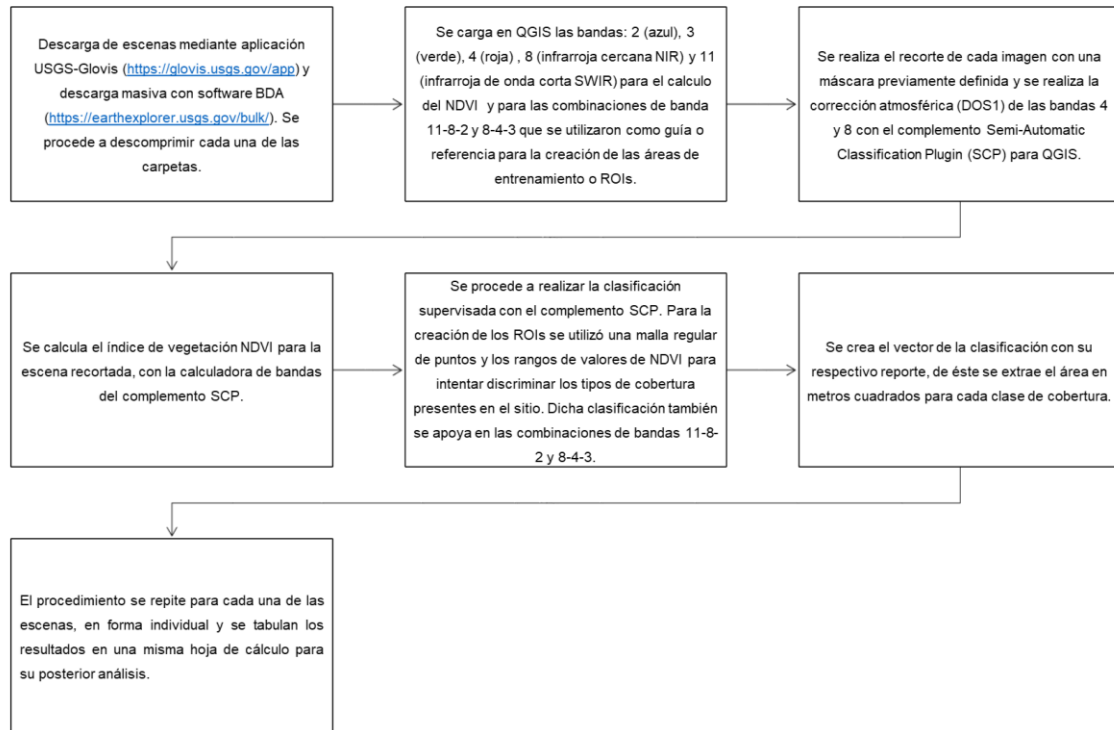


Figura 36. Esquema resumen de la metodología empleada para clasificar la cobertura del humedal de la Laguna Palo Verde, Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste.

3.3.3 Estimar la biomasa, carbono y dióxido de carbono equivalente por encima del espejo de agua almacenados en la Laguna Palo Verde del Parque Nacional Palo Verde mediante técnicas de aplicación de datos de sensores remotos y software de acceso libre.

- 1) Para la estimación de la biomasa se utilizó el estudio realizado en la Laguna de Palo Verde por Calvo-Alvarado y Solano (2004) llamado *“Estudio de la distribución y la abundancia de Parkinsonia aculeata y Typha dominguensis en el Humedal Palo Verde, Parque Nacional Palo Verde, Costa Rica”*. De acuerdo con este estudio, inicialmente se definieron 4 estratos de muestreo pero tal y como lo indican los autores: *“Con base en la similitud de los valores de biomasa y el traslape de errores estándar entre el estrato 2 y 3, se decidió unir ambos para tener estratos continuos (...) los dos nuevos estratos son estadísticamente diferentes y se puede comprobar con los valores de la comparación mediante la prueba de Tukey (...) La tendencia explicada en la unión de los estratos nos lleva a poder definir dos estratos para el bloque de Typha según los valores de biomasa (...) Los valores promedio de biomasa, el error estándar y los límites para un 95% de confianza se presentan en el cuadro 9”* (este cuadro se renombra con el nombre de Tabla 8 para efectos de continuar la numeración del documento).

Tabla 8. Valores para los estratos definidos según biomasa de *Typha dominguensis*

Estratos	Promedio Biomasa (gramos)	Biomasa (gramos) Error Estándar	Biomasa -95%	Biomasa +95%	N
1	694,3708	59,72130	572,4036	816,3380	14
2	488,3969	52,66924	380,8319	595,9618	18

Fuente: Calvo-Alvarado, Solano (2004). *Estudio de la distribución y la abundancia de Parkinsonia aculeata y Typha dominguensis en el Humedal Palo Verde, Parque Nacional Palo Verde, Costa Rica.*

Por otra parte, continuando con el mismo estudio, el cuadro 13 muestra los resultados del muestreo por estratos, en valores por hectárea y por parcela, sin embargo, para efectos de la presente investigación dicho cuadro se renombra con el nombre de Tabla 9.

Tabla 9. Resultados del muestreo en cada uno de los estratos para *Typha dominguensis*

	Estrato 1	Estrato 2
Área Estrato (ha)	27,14	97,21
Tamaño Muestra	14	18
Proporción	0,22	0,78
Fracción muestreo	0,000012	0,000015
Promedio gramos (gramos/parcela)	694,37	488,40
Desviación Estándar (gramos/parcela)	215,10	229,64
Promedio gramos (gramos/ha)	6943708,03	4883968,65
Desviación Estándar (gramos/ha)	2150986,04	2296429,42
Error Estándar (gramos/parcela)	57,49	54,13
Error Estándar (gramos/ha)	574871,89	541269,59
Total biomasa (ton)	18,84	46,01

Fuente: Calvo-Alvarado, Solano (2004). *Estudio de la distribución y la abundancia de Parkinsonia aculeata y Typha dominguensis en el Humedal Palo Verde, Parque Nacional Palo Verde, Costa Rica*. **Nota:** En la tabla se resaltan los valores de referencia empleados en la presente investigación para la estimación de la biomasa, carbono y CO₂-equ.

Para efectos de la presente investigación se tomó como valor de referencia de biomasa por unidad de área los valores de la Tabla 9, específicamente: para las zonas clasificadas de acuerdo con la Tabla 7 como “*Vegetación 1 (herbácea, menos densa)*” el valor de 4 883 968,65 gramos/ha del estrato 2 del estudio de Calvo-Alvarado y Solano (2004). Mientras que para las zonas clasificadas de acuerdo con la Tabla 7 como “*Vegetación 2 (herbácea, más densa)*” el valor de 6 943 708,03 gramos/ha del estrato 1 del mismo estudio de referencia.

Tabla 10. Valores de referencia utilizados para el calculo de biomasa, carbono y CO₂-eq en dos tipos de cobertura de vegetación herbácea en toneladas por hectárea.

	<i>Typha dominguensis</i> Mayor densidad	<i>Typha dominguensis</i> Menor densidad
	Estrato 1	Estrato 2
Promedio gramos (gramos/ha)	6 943 708,03	4 883 968,65
ton/ha	6,9	4,9

A continuación, se enlistan los pasos seguidos:

- 1) Se utilizaron los valores de biomasa reportados en este estudio de campo transformados a toneladas por hectárea (ton/ha) (Tabla 10) extrapolándolos a la unidad de área obtenida mediante la clasificación de la escena Sentinel-2.
- 2) Para realizar la conversión a carbono del cálculo estimado de biomasa aérea (Ba) se asumió que el contenido de carbono es cercano al 50% de la biomasa total (IPCC (2003); Cáceres, Martín Y Salas (2015)). De acuerdo con IPCC (2006) los valores por defecto son 0,50. tonelada C (tonelada d.m.)⁻¹ para biomasa leñosa y 0,47 toneladas C (tonelada d.m.)⁻¹ para biomasa herbácea. Por tanto, se utilizó este último factor o valor por defecto de 0,47 toneladas de carbono para el caso en estudio.
- 3) Para la conversión de carbono a CO₂-eq se utilizó la metodología propuesta por el IPCC (2003), (2005) y (2006), la cual establece que para convertir la cantidad de carbono almacenada se requiere multiplicar la cantidad de toneladas de carbono almacenados por un factor de 3,6711 que corresponde a la proporción del peso molecular de CO₂ a carbono (t CO₂-eq).

CAPITULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Caracterizar topográficamente la Laguna Palo Verde del Parque Nacional Palo Verde mediante técnicas convencionales y/o de aplicación de datos de sensores remotos y software de acceso libre.

4.1.1 Modelo de Terreno (MDT)

El Modelo de terreno se obtuvo mediante software de código abierto SAGA, QGis y utilizando el algoritmo IDW a 5 m de resolución espacial, se escogió una resolución espacial de 5m porque la zona de estudio es muy plana y extensa por lo cual no se diferencia mucho los cambios de elevación a una menor resolución espacial.

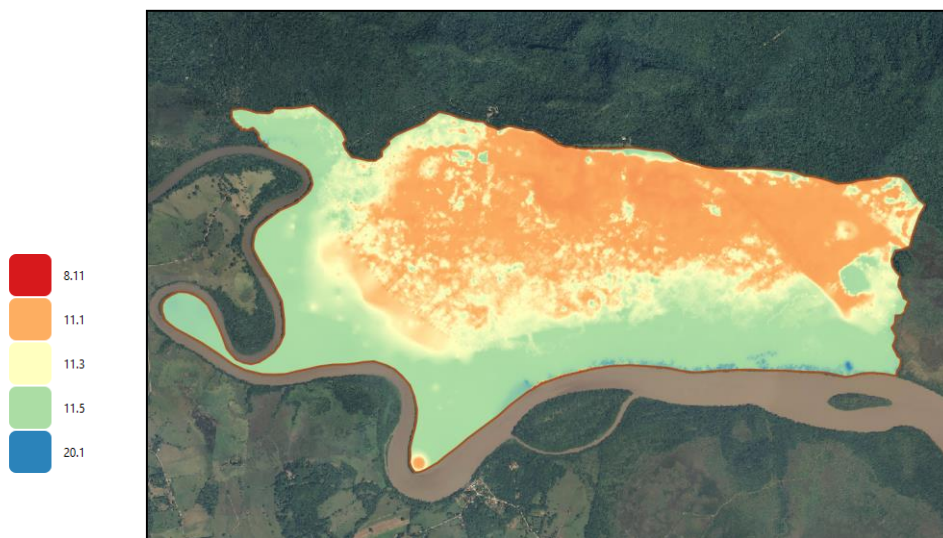


Figura 37. Modelo Digital de Terreno (MDT), Laguna Palo Verde, Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica.

En la escala grafica se puede observar las diferencias de elevación que oscilan entre 8,11 m y 20,10 m. El método de interpolación IDW, según (Watson y Philip 1985)...*"Los mejores resultados de la IDW se obtienen cuando la muestra es lo suficientemente densa respecto de la variación local que intenta simular. Si la muestra de los puntos de entrada es dispersa o despereja, los resultados pueden no representar en forma suficiente la superficie deseada."*

El IDW fue elegido especialmente porque exponente de ponderación de la distancia puede controlar con precisión la influencia de las distancias, es un método que procesa rápidamente los datos, esto puede ser algo ventajoso cuando el volumen de datos es muy elevado como es el caso de nuestra investigación.

4.1.2 Modelo de Terreno (MDT) con curvas de Nivel

En el software de código abierto QGIS se generaron curvas de nivel a cada 25cm para un mejor análisis del relieve en el área de estudio.



Figura 38. Modelo de Terreno (MDT), con curvas de nivel, Laguna Palo Verde, Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica.

4.1.3 Establecimiento Hitos

Se establecieron dos Hitos amojonados, para futuros proyectos de investigación, las coordenadas tridimensionales (este, norte y elevación) se obtuvieron por medio de esta tecnología GNSS, con un rango de observación 4 horas de medición en cada hito.

Los datos fueron utilizados para comprobar la posición y precisión con respecto al levantamiento topográfico realizado en el año 2003-2004, así como para georreferenciar en la proyección CRTM05 toda la información con la que se trabajó toda la investigación.



Figura 39. Descripción Hito 1 y Hito 2

Los dos puntos de control **Hito 1-Hito 2** se establecieron con una separación de 3030,29 m entre ellos, por aspectos topográficos y también por el hecho de tener que escoger los sitios de mejor recepción de la señal de los satélites,

El Hito 1 se encuentra cerca de la estación meteorológica y el Hito 2 cerca de una construcción localiza por el muelle de lanchas.

Tabla 11. Ubicación geográfica de los hitos monumentados en campo, sistema de proyección CRTM05, Laguna Palo Verde, Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica.

Nombre	Este	Norte	Elevaciones medidas
HITO-2	350 384,4900	1 143 893,3900	12,7100
HITO-1	3534 08,9300	1 144 089,9000	12,9590

4.1.4 Histograma

En el software de código abierto SAGA se generó un histograma, en cual se puede visualizar la distribución de frecuencias en el eje y en el eje x los valores de elevación, en el caso del área de estudio los picos representan los valores más comunes del set de datos, es un multimodal porque se visualizan dos picos de información, tiene un ajuste

adecuado porque es simétrico, los conglomerados más altos se encuentran en el rango de 11,10 m y 11,20 m, y se localizan las elevaciones más bajas se visualiza un conglomerado menor en el rango de 11,51 m – 11,89 m, no presenta valores atípicos.

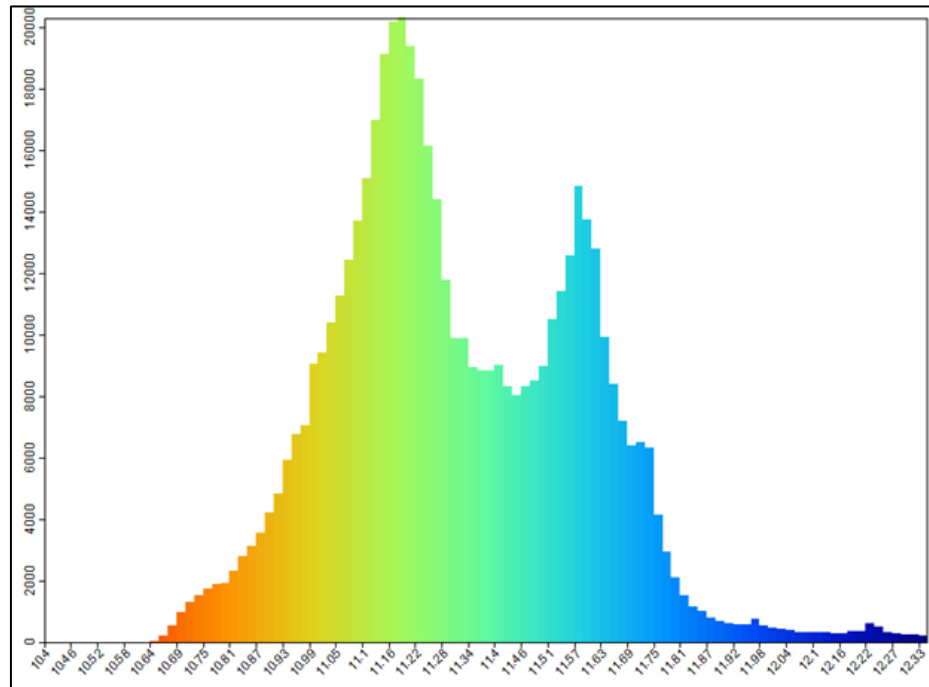


Figura 40. Histograma Modelo de Terreno (MDT), Laguna Palo Verde

4.1.5 Validación Modelo de Elevación

Se realizó validación del MED (IDW) con respecto a la información de la datos levantados en campo con tecnología GNSS, se tomó una muestra de 27 datos levantados en campo la distribución de ellos no se realizó en forma aleatorio, debido a las condiciones propias del lugar, la laguna estaba llena de agua, con gran cantidad de vegetación, animales silvestres, sin caminos para acceder, las condiciones climáticas con altos índices de precipitación, factores que limitaron el ingreso a varias zonas, se compararon las elevaciones MED interpolado por medio IDW contra la elevaciones de los datos levantados con tecnología GNSS teniendo un resultado de un RMSE : 0,168.

Tabla 12. Datos levantados en campo GNSS –versus- Datos estimados MED (IDW)

Nombre	Norte CRTM05	Este CRTM05	Elevación Medidas (m)	Elevación IDW (m)	Diferencia (m)	Error cuadrático medio RMSE
BAC1	1 144 089,076	353 415,991	12,950	12,755	0,195	0,168
EM1	1 144 086,709	353 409,358	12,959	12,955	0,004	
PN-31879	1 142 054,733	349 724,447	11,980	11,980	0,000	
PN-31875	1 142 653,328	349 058,512	13,250	13,250	0,000	
HITO-2	1 143 893,390	350 384,490	12,710	12,690	0,020	
DR-3	1 143 871,710	350 393,920	12,626	12,445	0,181	
MUELLE-01	1 144 085,770	353 066,690	11,350	11,116	0,234	
MUELLE-04	1 144 042,140	353 047,020	11,750	11,556	0,194	
MUELLE-05	1 144 023,200	353 023,300	12,650	12,360	0,290	
PN-01	1 144 023,120	353 024,420	12,656	12,360	0,296	
MUELLE-06	1 144 022,030	353 025,290	12,375	12,360	0,015	
PN-24	1 144 106,590	353 401,840	12,445	12,380	0,065	
PN-25	1 144 107,860	353 406,380	12,921	12,780	0,141	
PN-26	1 144 107,870	353 407,950	12,346	12,424	-0,078	
ANCLA-01	1 144 103,110	353 402,470	12,706	12,611	0,094	
CLAVO-20	1 144 103,310	353 408,300	12,870	12,713	0,157	
ANCLA-02	1 144 104,080	353 413,190	12,733	12,485	0,248	
ANTENA-01	1 144 100,270	353 407,890	12,936	12,713	0,223	
ANCLA-03	1 144 094,370	353 408,520	13,192	12,9761	0,216	
PLANCHE-04	1 144 093,530	353 407,481	12,997	13,117	-0,120	
PLANCHE-03	1 144 091,390	353 407,670	13,002	13,117	-0,115	
PLANCHE-01	1 144 093,800	353 409,640	13,001	13,117	-0,116	
PLANCHE-02	1 144 091,650	353 409,860	12,991	13,117	-0,126	
HITO-1	1 144 089,900	353 408,930	12,959	13,117	-0,158	
PN-52	1 144 082,760	353 406,250	12,429	12,462	-0,033	
PN-51	1 144 083,270	353 409,390	12,706	12,574	0,131	
PN-50	1 144 084,370	353 414,080	12,432	12,755	-0,323	

El error cuadrático medio (RMSE) mide la cantidad de error que hay entre dos conjuntos de datos, en la segunda validación se analizaron los datos derivados del LVIS con respecto a información del MED (IDW), del total de datos 31 862 del LVIS, se tomó una muestra del 10% que corresponde a 3 186 registros donde se compararon las elevaciones MED (IDW) contra las elevaciones de los datos LVIS obteniendo como resultado un RMSE: 0,227.

Tabla 13. Datos LVIS –versus- Datos estimados MED (IDW)

FID	Norte CRTM05	Este CRTM05	Elevación Medidas (m)	Elevación IDW (m)	Diferencia (m)	Error cuadrático medio RMSE
1	1 141 845,176	351 890,915	11,578	11,604	-0,026	0,227
2	1 141 925,659	351 493,925	11,658	11,570	0,088	
3	1 142 125,256	351 221,759	11,548	11,510	0,038	
4	1 142 306,042	350 654,899	11,728	11,698	0,030	
5	1 142 333,352	350 782,308	11,578	11,582	-0,004	
6	1 142 290,781	355 915,314	11,478	12,139	-0,661	
7	1 142 378,222	350 650,700	11,598	11,605	-0,007	
8	1 142 449,727	350 651,934	11,558	11,554	0,004	
9	1 142 451,266	351 073,792	11,368	11,342	0,025	
10	1 142 457,483	351 237,261	11,258	11,235	0,022	
***	***	***	***	***	***	
3186	1 142 294,982	349 411,970	12,230	12,378	-0,148	

Comparando los resultados obtenidos en ambas validaciones, se puede observar el que resultado es un valor cercano a cero lo que indica que los valores, predichos y observados son muy cercanos. Respecto al método de interpolación utilizado (IDW) Inversa Distance Weigth, es un método que procesa rápidamente los datos (esto puede ser algo ventajoso cuando el volumen es muy grande), aunque al modelar la superficie presenta la tendencia de generar patrones concéntricos alrededor de los puntos originales, (lo cual lo convierte en el interpolador con mayor RMSE del estudio) esto

sucede por el peso que se le da a la variación particular del valor de un punto del muestreo sobre los que están a su alrededor.

4.2 Clasificar la cobertura de la tierra específicamente en la Laguna Palo Verde del Parque Nacional Palo Verde mediante técnicas convencionales y/o de aplicación de datos de sensores remotos y software de acceso libre.

En la Tabla 14 se muestra el valor anual de las variables hidroclimáticas para el período 2008-2017 (9 años) en el Parque Nacional Palo Verde, Costa Rica. La Figura 41 muestra los resultados del balance hídrico según Thornthwaite y Mather (1957).

Tabla 14. Variables hidroclimáticas para el período 2008-2017 en el Parque Nacional Palo Verde, Costa Rica.

Variable	PN Palo Verde – Costa Rica
Precipitación anual (mm)	1645,3 ($\pm 476,2$)
Temperatura promedio ($^{\circ}\text{C}$)	27,1 ($\pm 0,9$)
Exceso de agua (mm)	786,6 ($\pm 373,2$)
Déficit de agua (mm)	737,0 ($\pm 180,0$)
Evapotranspiración anual real (mm)	950,4 ($\pm 163,9$)

Nota: Valores entre paréntesis (\pm) muestran la desviación estándar.

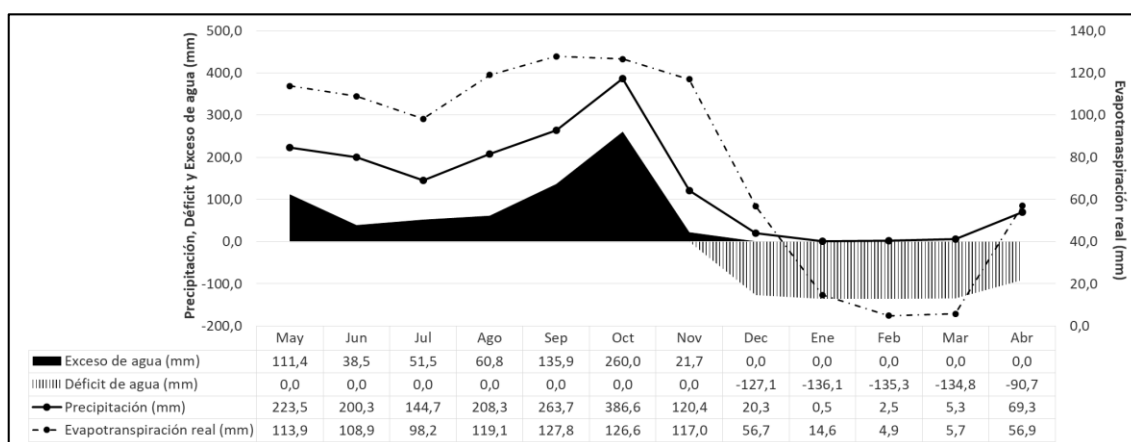


Figura 41. Balance hídrico según (Thornthwaite y Mather, 1957) para el período 1 de mayo de 2008 – 30 de abril de 2017, para la estación meteorológica del Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica.

De acuerdo con la figura anterior, con el objetivo de seleccionar adecuadamente una imagen del sensor Sentinel-2 representativa de la época lluviosa y de la época seca, se determinó que idealmente para la temporada de lluvias el mejor mes corresponde a octubre que es cuando se tiene el valor más elevado de exceso de humedad en el sistema, mientras que para la temporada seca los mejores meses corresponden a aquellos comprendidos en el período de diciembre a abril. Por tanto, esto justifica la selección de escenas correspondientes al 14 de marzo del 2020 (para época seca) y del 15 de octubre del 2020 (para época lluviosa).

En la Figura 42 se muestra el resultado obtenido de NDVI para cada una de las escenas, así la combinación de bandas 8-4-3 y 11-8-2 que se calcularon para apoyar la categorización de las áreas de entrenamiento de la clasificación supervisada.

Para la época seca se obtuvo valores de NDVI en un rango de $-0,1 - 0,83$, mientras que para época lluviosa el rango varió de $-0,51 - 0,89$.

En la Figura 43 y 44 se muestra el resultado de realizar la clasificación supervisada en la Laguna Palo Verde, y se resumen los valores en hectáreas que se obtuvieron por tipo de cobertura.

Si bien el polígono inicial de la Laguna de Palo Verde correspondía a un área aproximada de 1289 hectáreas, finalmente la clasificación refleja un área de aproximadamente 1273 hectáreas, siendo que 16 hectáreas no se ven reflejadas en la clasificación. Esta “pérdida” de aproximadamente 16 hectáreas responden principalmente a los diferentes procesos de rasterización llevados a cabo, siendo que casi todo el flujo de trabajo se llevó a cabo en formato ráster para finalmente vectorizar la clasificación. A pesar de considerarse una vectorización ortogonal, se perdió área al pasar de ráster a vector en los bordes del polígono de la laguna ya que debe considerarse que la misma presenta un perímetro sinuoso favoreciendo dicha disminución.

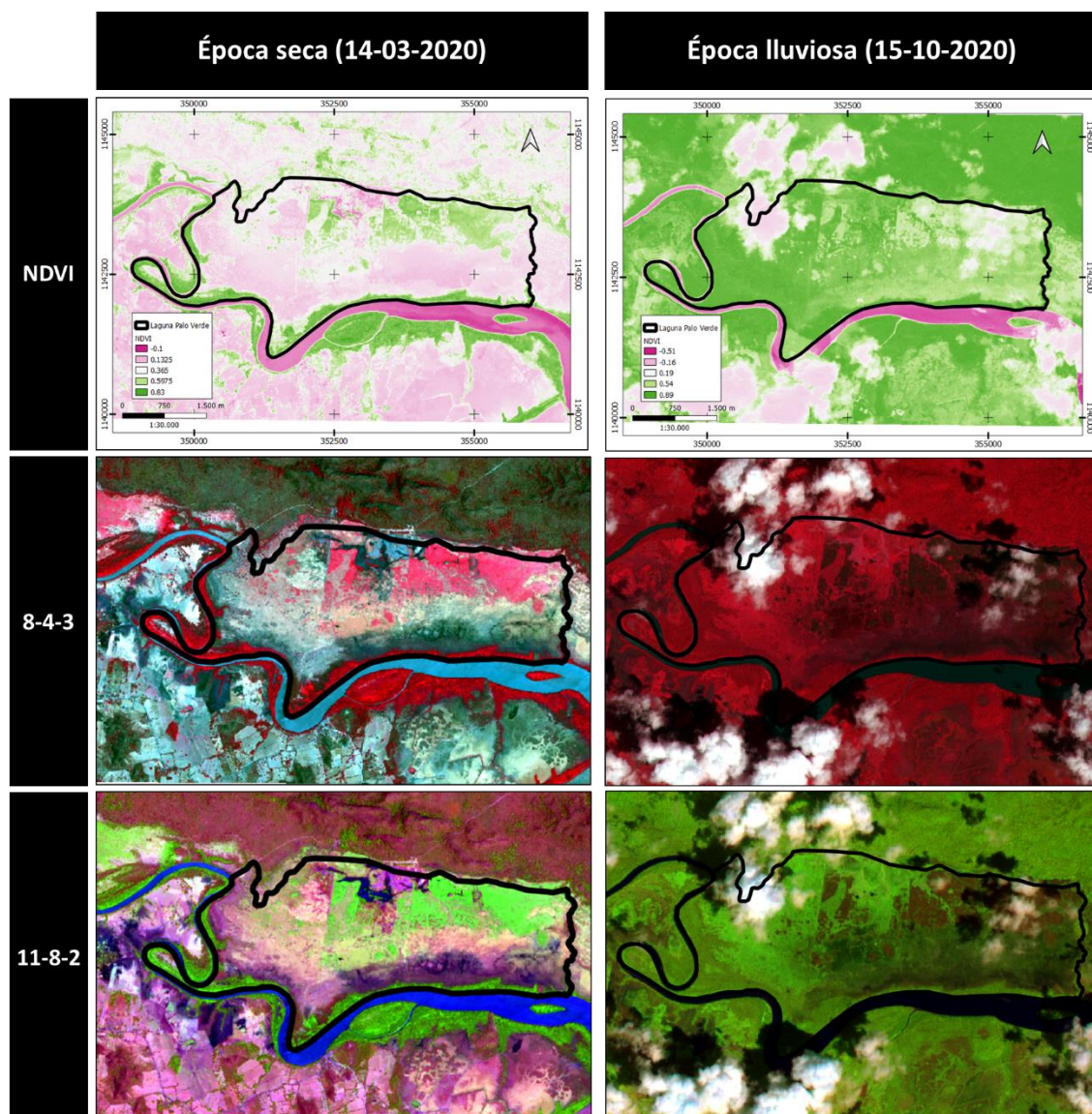


Figura 42. Resultados de NDVI y combinación de bandas 8-4-3 y 11-8-2 que sirvieron de apoyo para la clasificación supervisada, Laguna Palo Verde, Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica.

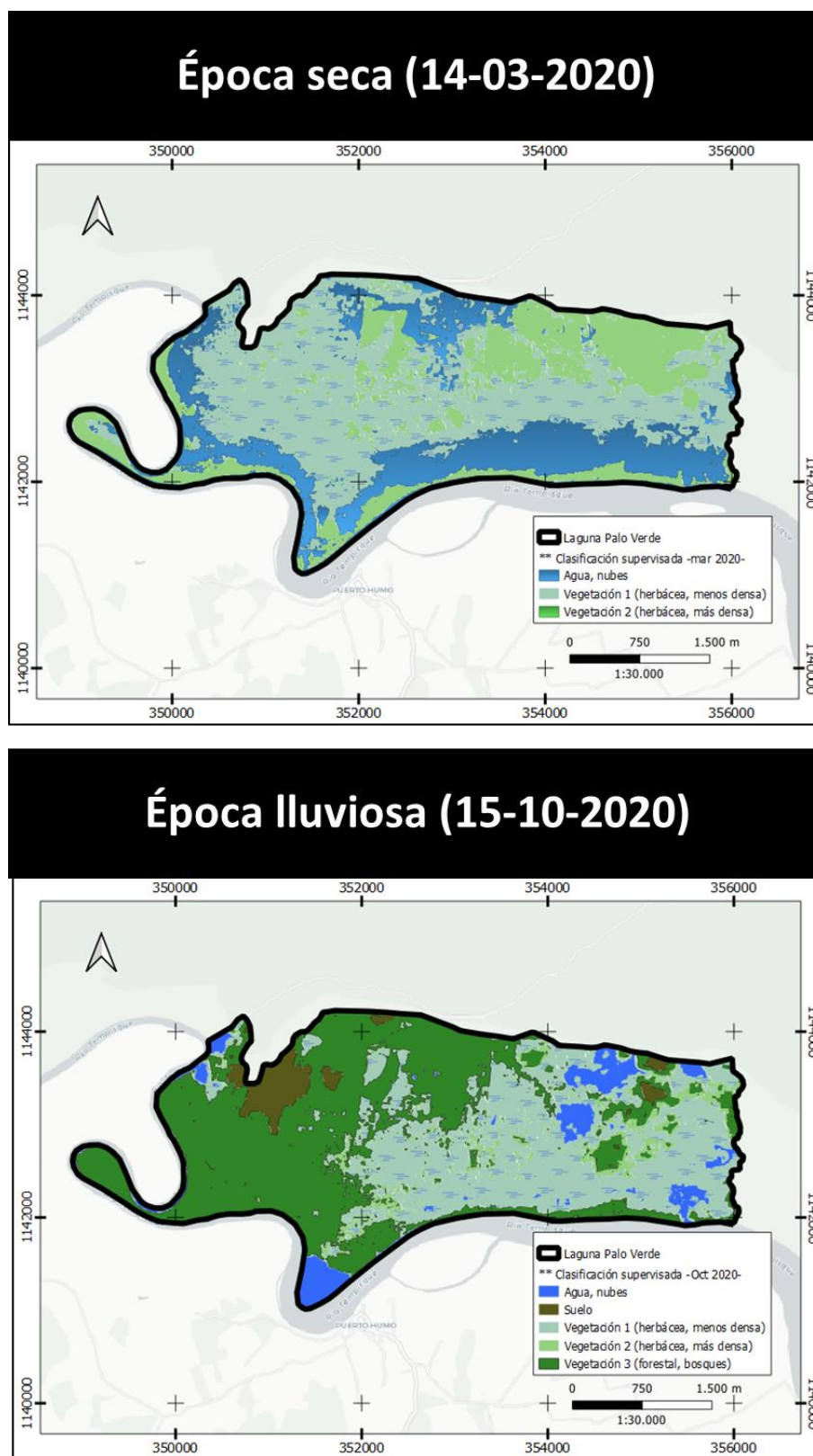


Figura 43. Resultado de la clasificación supervisada en la Laguna Palo Verde, Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica.

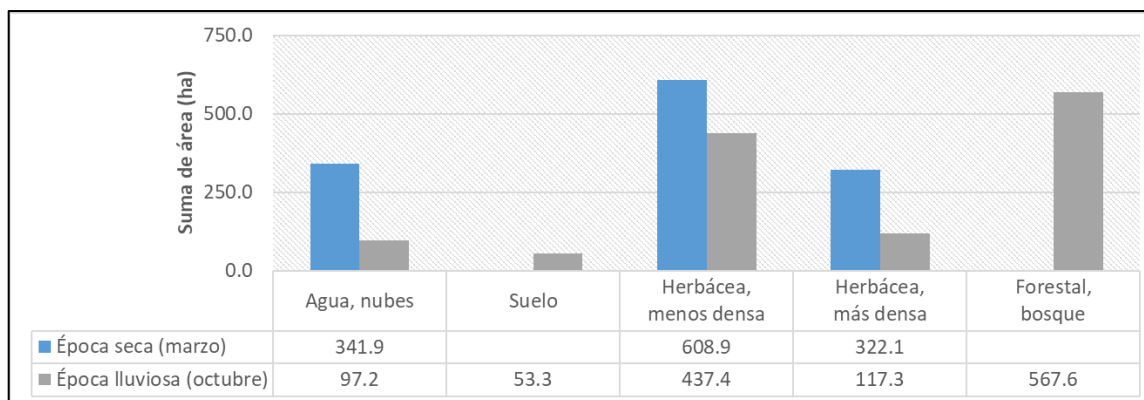


Figura 44. Cuantificación de área en hectáreas por tipo de cobertura, Laguna Palo Verde, Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica, año 2020.

De acuerdo con los datos mostrados en la figura anterior es posible apreciar como en época seca (marzo 2020) solamente fue posible clasificar tres tipos de cobertura: agua-nubes, herbácea menos densa y herbácea más densa.

La imagen del mes de marzo fue la que contaba con menor porcentaje de cobertura de nubes (0-5% Cloud cover) por lo que posiblemente el área obtenida de 341,9 ha se deba más al efecto del agua que de las nubes. La disminución del 72% entre la cobertura de Agua -Nubes de la época seca respecto a la lluviosa se puede deber entre otras cosas a que, tal y como se delimitó al inicio de la investigación, se realizó una clasificación sobre el espejo de agua, y la zona de estudio presenta abundancia de especies caducifolias por lo que durante la época lluviosa es de esperar que la cobertura foliar se vea incrementada dificultando la separabilidad del agua respecto a la vegetación.

No se cuantificó la categoría de suelo durante la época seca lo que podría deberse a que durante la época seca proliferan especies herbáceas de bajo porte y otras más invasivas como la tifa, la cual estrangula y coloniza todas aquellas áreas lodosas y disponibles para crecimiento. Por esta razón, su manejo ha representado un gran reto dentro del área protegida, afectando los patrones de migración y percha de las aves locales y migratorias durante esta época del año.

Además, durante la época seca no se vio reflejada la categoría forestal-bosques, ya que principalmente, dentro de esta laguna existe mayor abundancia de especies caducifolias.

Así, durante la época seca pierden sus hojas y no se ven reflejadas en el NDVI como vegetación robusta o saludable, en su lugar se observa vegetación herbácea de menor o mayor densidad.

En contraposición, durante la época lluviosa fue posible identificar los cinco tipos de cobertura que se consideraron para el presente estudio. Es posible observar cómo la categoría de agua disminuye considerablemente, posiblemente por el efecto de la vegetación acuática que cubre el espejo de agua. Durante esta época se cuantifica suelo, tal vez a causa de sectores lodosos dentro de la laguna y en los cuales la vegetación acuática no tiene la capacidad de proliferar. Por otra parte, las coberturas del tipo herbáceas disminuyen para dar cabida a coberturas más forestales, asociadas a ecosistemas de tipo ripario asociados al Río Tempisque y a las zonas de menor profundidad.

4.3 Estimar la biomasa, carbono y dióxido de carbono equivalente por encima del espejo de agua almacenados en la Laguna Palo Verde del Parque Nacional Palo Verde mediante técnicas de aplicación de datos de sensores remotos y software de acceso libre.

De acuerdo con la Figura 45, considerando únicamente la cobertura del tipo herbácea (menos densa y más densa), es posible determinar como el $\text{CO}_{2\text{-equ}}$ es mayor en un 28,2% para la cobertura menos densa y un 63,6% para la cobertura más densa.

Por tanto, considerando un escenario en el cual se logre manejar de forma completa la tifa y se elimine totalmente del humedal de la Laguna de Palo Verde, de acuerdo con la Figura 45, sería importante valorar la opción de compensar mediante otros proyectos alternos un mínimo 5 091,6 toneladas de $\text{CO}_{2\text{-equ}}$ y hasta 8 990,4 toneladas, producto de la pérdida de dicho repositorio que se encuentra almacenado en esta cobertura.

Por otra parte, la diferencia de que la tifa represente mayor magnitud de biomasa, carbono y $\text{CO}_{2\text{-equ}}$ durante la época seca respecto a la época lluviosa, podría deberse a que especies como la tifa sean capaces de prosperar de forma invasiva en ambientes de mayor déficit hídrico, lo cual explica ampliamente el reto que significa su control durante la época seca del año. Su proliferación estrangula los espejos de agua de la

laguna, limitando su función ecológica como sitio para la migración y reproducción de especies de aves.

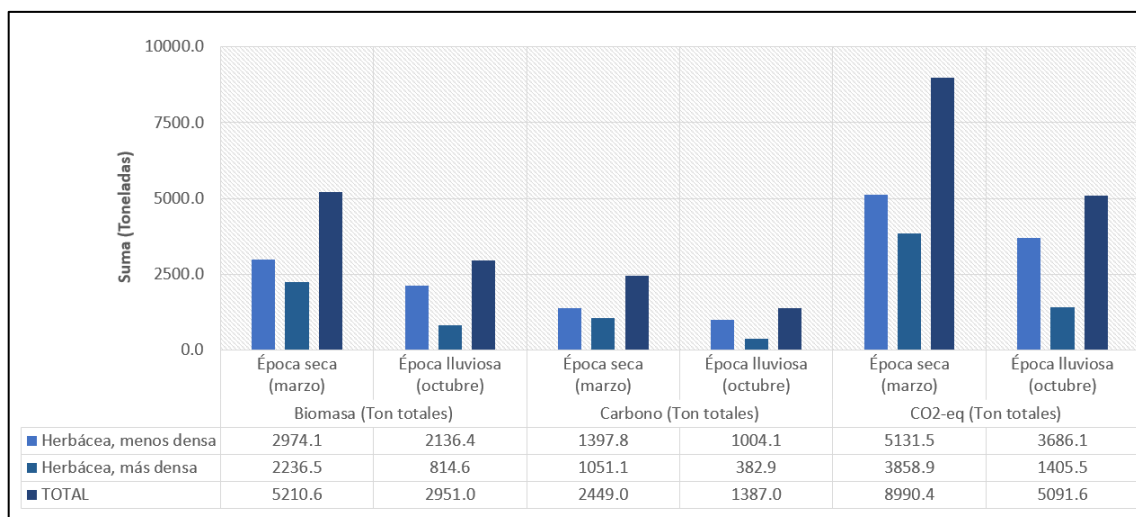


Figura 45. Comparación por época del cálculo de biomasa, carbono y CO₂-equ específicamente para la cobertura del tipo herbácea en la Laguna Palo Verde, Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste, Costa Rica, año 2020.

Este análisis consideró únicamente las coberturas del tipo herbácea que es donde se circunscribiría la tifa. Si bien las variables de biomasa, carbono y CO₂-equ disminuyen durante la época lluviosa, es importante enfatizar que corresponde únicamente a dicho tipo de cobertura. Un estudio más integral de toda la vegetación de la laguna consideraría la cobertura forestal y/o bosques dentro de la laguna, ya que posiblemente este tipo de cobertura compensaría la pérdida que se da en la categoría de herbáceas.

Sin embargo, el alcance de este proyecto permite cuantificar de forma exploratoria las toneladas de CO₂-eq requeridas a ser compensadas por otros mecanismos, en caso de que el problema de la tifa fuera controlado de forma exitosa, ya sea con proyectos de reforestación comercial, de restauración ecológica, de enriquecimiento forestal dentro con especies de rápido crecimiento o cualquier otra alternativa de captura de carbono.

CAPITULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- 1) Con relación al Modelo Digital del Terreno (MDT), obtenido para el humedal de la laguna Palo Verde en un área 1289 hectáreas, los rangos de elevación oscilan entre 8,11 metros el nivel más bajo y 20,10 metros el nivel más alto, con una resolución espacial de 5 metros.
- 2) La investigación fue capaz de generar curvas de nivel a 0,25 cm, por tanto, se puede concluir que sí es posible construir un MDT óptimo que puede ser utilizado en la modelización hidrológica a partir de datos de sensores remotos ya existentes (tal como el lidar LVIS) y con verificación topográfica de campo.
- 3) Por las condiciones de la laguna que contiene una vegetación densa no se recomienda realizar una batimetría ya que el instrumento tradicional como la ecosonda no podría generar un barrido del fondo, y el realizar un fondeo de manera manual en el área de la laguna implicaría cuantiosos recursos de tiempo y dinero, por lo cual este MDT puede ser utilizado para obtener información de campo valiosa y eventualmente para planificar futuros muestreos estratificados en función de la topografía del humedal.
- 4) Se valoró el efecto de usar datos de alta resolución espacial tales como un MDT de malla o grilla de 1x1 metros en relación a ejecutar ese mismo análisis utilizando datos de densidad media con una malla o grilla de 5 x5 metros, sin embargo, al generar el MDT con la malla de 1x1 m se generó un archivo muy pesado, con un costo de procesamiento más alto.

Por tanto, debe valorarse la significancia de utilizar resoluciones espaciales altas o medias para este tipo de análisis. Adicionalmente, mediante la siguiente investigación se obtuvo como resultado que no se visualizó diferencia de elevación en el MDT independientemente si se utilizaba una resolución alta o media y se puede concluir que la densidad de la malla no es crítica y con una grilla o resolución media se pueden obtener resultados con poca variabilidad, mientras que una resolución alta se podría considerar para una mejor o más detallada visualización de los resultados.

5) Con respecto a la validación el MDT, la utilización de los productos geomáticos para distintos proyectos ingenieriles exige que estos productos cumplan con estándares de calidad; en consecuencia, el MDT generado paso por dos controles que consistieron en:

- Contraste de la altimetría del MDT respecto a puntos obtenidos por técnicas GPS, que, además, fueron post-procesados y siendo el error medio cuadrático (RMSE) de 0,168 metros.
- Contraste de la altimetría de los datos LVIS (muestra del 10% que corresponde a 3 186 registros) respecto a la altimetría del MDT, siendo el error medio cuadrático (RMSE) de 0,227 metros.

Por consiguiente, la utilización de los datos del MDT es perfectamente válida y cumple con criterios de calidad, ya que las variaciones de la media cuadrática observada se encuentran en un rango menor a un metro.

- 6) Se determinó que el mes que representa de mejor forma la época lluviosa del sitio de estudio es octubre, mientras que la mejor época para analizar una escena satelital para la época seca corresponde a cualquier mes del periodo comprendido entre diciembre y abril.
- 7) Para la época seca se obtuvo valores de NDVI en un rango de -0,1 a 0,83, mientras que para época lluviosa el rango varió de -0,51 a 0,89.
- 8) En época seca (marzo 2020) fue posible clasificar tres tipos de cobertura: agua-nubes, herbácea menos densa y herbácea más densa. Durante época lluviosa fue posible cuantificar área en los cinco tipos de cobertura que se consideraron para el presente estudio. Es posible observar cómo la categoría de agua disminuye considerablemente, posiblemente por el efecto de la vegetación acuática que cubre el espejo de agua. Se cuantifica suelo, tal vez a causa de sectores lodosos dentro de la laguna y en los cuales la vegetación acuática no tiene la capacidad de proliferar. La cobertura del tipo herbácea disminuye durante la época lluviosa para dar cabida

a coberturas con mayor reflectancia y más forestales, asociadas a las zonas riparias del Río Tempisque y a las bordes del humedal.

- 9) Considerando únicamente la cobertura del tipo herbácea (menos densa y más densa), es posible determinar como el $\text{CO}_{2\text{-equ}}$ es mayor en un 28,2% para la cobertura menos densa y un 63,6% para la cobertura más densa.
- 10) Considerando un escenario en el cual se logre manejar de forma completa la tifa y se elimine totalmente del humedal de la Laguna de Palo Verde, esta investigación propone de forma exploratoria la importancia de valorar la opción de compensar mediante otros proyectos alternos un mínimo 5 091,6 toneladas de $\text{CO}_{2\text{-equ}}$ y hasta 8 990,4 toneladas, producto de la pérdida de dicho repositorio que se encuentra almacenado en esta cobertura.
- 11) En época seca se podría realizar un levantamiento con vehículos aéreos no tripulados (Drone de Ala Fija) para obtener un mejor detalle de la zona.
- 12) Se recomienda utilizar el MDT generado para estratificar la medición de los niveles de agua, con la ayuda de estaciones hidrométricas, reglas graduadas (estadías) colocadas escalonadamente en la laguna para medir la cantidad de agua disponible, por lo que se requerirá de personal capacitado que se encargue de registrar los niveles del agua en horas preestablecidas o bien idear algún mecanismo automatizado que permita el almacenamiento en un data logger de mediciones programadas de niveles.
- 13) Densificar la red de hitos topográficos en puntos estratégicos en la zona para tener una red geodésica local, referida al sistema CRTM05.
- 14) Clasificar la cobertura de la laguna mediante otras técnicas modernas tales como Collect Earth, Google Engine o el paquete estadístico para el software R "RStoolbox".
- 15) Establecer en campo zonas de entrenamiento para llevar a cabo la clasificación supervisada.

- 16) Ampliar el estudio a toda la cobertura de la laguna y no únicamente a la tifa. Esto permitiría estimar las toneladas de biomasa, carbono y $\text{CO}_{2\text{-eq}}$ por cada categoría de cobertura de la tierra (suelo y forestal).
- 17) Los datos originalmente se obtienen en cotas elipsoidales debido al uso de posicionamiento por satélite, sin embargo, dependiendo del requerimiento pueden ser transformados en cota ortométrica.

BIBLIOGRAFÍA

- Brown, S., & Lugo, A. E. (1992). Aboveground biomass estimates for tropical moist forests of the Brazilian Amazon. *Interciencia*, 17(1), 8-18.
- Cáceres, J., Martín, M. P., & Salas, J. (2015). Análisis temporal de biomasa y stocks de carbono en un ecosistema de dehesa mediante imágenes Landsat, y su relación con factores climáticos. *Revista Ciencias Espaciales*, 8(1), 190-211. Recuperado el 13 de 7 de 2019, de http://digital.csic.es/bitstream/10261/141362/1/Caceres%20et%20al_2015_RCE.pdf
- Calvo-Alvarado, JC; Solano, JC. (2004). Estudio de la distribución y la abundancia de *Parkinsonia aculeata* y *Typha domingensis* en el Humedal Palo Verde, Parque Nacional Palo Verde, Costa Rica. Informe final proyecto de investigación. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Organización para Estudios Tropicales, Escuela de Ingeniería Forestal.
- Calvo-Alvarado, J. C., & Arias, R. O. (2006). *Estudio de Evapotranspiración de la Tifa en el (Typha domingensis) en el Parque Nacional Palo Verde, Guanacaste-Costa Rica*. Informe final proyecto de investigación. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Organización para Estudios Tropicales, Escuela de Ingeniería Forestal.
- Calvo-Alvarado, J. C., & Castillo, M. (2007). *Modelo de Elevación Digital empleando SRTM, Humedal Laguna Palo Verde: Primera aproximación*. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Organización para Estudios Tropicales, Escuela de Ingeniería Forestal.
- Collins, M. E., & Kuehl, R. J. (2000). Organic matter accumulation and organic soils. En J. L. Richardson, & M. J. Vepraskas (Edits.), *Wetland soils: genesis, hydrology, landscapes and classification* (págs. 137-162). Boca Ratón, FL, USA: Lewis Publishers.

- Convención sobre los humedales. (1998). *Procedimiento de Orientación para la Gestión Sitio Ramsar Parque Nacional Palo Verde Costa Rica*. Gland, Suiza. Recuperado el 9 de 7 de 2019, de https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/ram39s_palo_verde_cont_informe_combined.pdf
- Decreto Ejecutivo N° 35803-MINAET. (1 de 7 de 2010). *Criterios Técnicos para la Identificación, Clasificación y Conservación de Humedales*. Costa Rica. Recuperado el 19 de 11 de 2018, de http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=67673&nValor3=88177&strTipM=TC
- DeFries, R., & Pagiola, S. (2004). Analytical Approaches for Assessing Ecosystem Condition and Human Well-being. En R. Hassan, R. J. Scholes, & N. Ash, *Ecosystems and Human Well-being: Current State and Trends: Findings of the Condition and Trends Working Group (Millennium Ecosystem Assessment Series)* (pág. 37). Island Press. Recuperado el 12 de 7 de 2019, de https://www.researchgate.net/publication/252603446_Analytical_Approaches_for_Assessing_Ecosystem_Condition_and_Human_Well-being
- Environmental Systems Research Institute. (2016). *Función NDVI*. Recuperado el 13 de 7 de 2019, de <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/ndvi-function.htm>
- ESA Sentinel Online. (s.f.). *Level - 1*. Recuperado el 13 de 7 de 2019, de <https://earth.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/processing-levels/level-1>
- ESA Sentinel Online. (s.f.). *Radiometric Resolutions*. Recuperado el 13 de 7 de 2019, de <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/resolutions/radiometric>
- Estado de la Nación. (6 de 2017). Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible 2017. *Estado de los humedales: nuevos desafíos para su gestión*. (A.

- Camacho Navarro, J. M. Herrera Zeledón, P. Vargas Alpízar, R. Jiménez Arce, N. Veas Ayala, F. Acuña Piedra, & M. Miranda Quirós, Recopiladores) Recuperado el 12 de 7 de 2019, de https://estadonacion.or.cr/files/biblioteca_virtual/023/Ambientales/Miranda-M_et-al_2017.pdf
- Felicísimo, A. M., 1994. Modelos Digitales del Terreno. Oviedo (España): Pentalfa. ISBN:84-7848-475-2
- GAO, J. (1997). Resolution and accuracy of terrain representation by Grid DEMs at a Microscale. *International Journal of Geographical Information Science*, 11(2), pp.192-212.
- Hengl, T.; Gruber, S. y Shrestha, D.P. (2004): Reduction of errors in digital terrain parameters used in soil-landscape modelling. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 5 (2):97–112.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2001). *The third assessment report, climate change 2001*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- KUMLER M. P., (1994). An intensive comparison of triangulated irregular networks (TINs) and digital elevation models. *Cartographica*. (1), pp. 1-9
- Ley N° 7554. (4 de 10 de 1995). *Ley Orgánica del Ambiente*. Costa Rica. Recuperado el 12 de 7 de 2019, de http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=27738&nValor3=116998¶m2=1&strTipM=TC&IResultado=4&strSim=simp
- Lowry, J. (2007). *La utilización de programas y datos de SIG de bajo costo para el inventario, la evaluación y el monitoreo de humedales*. Gland, Suiza. Recuperado el 12 de 7 de 2019, de https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/lib_rtr02_s.pdf

- Lozada, J. (2014). Investigación Aplicada: Definición, Propiedad Intelectual e Industria. *Cienciamérica*(3), 34-39. Recuperado el 3 de 7 de 2019, de <file:///C:/Users/u1/Downloads/Dialnet-InvestigacionAplicada-6163749.pdf>
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and Human Well-Being: Wetlands and Water Synthesis*. World Resources Institute, Washington, DC. Recuperado el 12 de 7 de 2019, de <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.358.aspx.pdf>
- Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones. (2015). Política nacional de biodiversidad 2015-2030. San José, CR. Recuperado el 12 de 7 de 2019, de <https://www.conagebio.go.cr/Conagebio/public/documentos/POLITICA-NACIONAL-DE-BIODIVERSIDAD-2015.pdf>
- Mitsch, W. J., & Gosselink, J. G. (2000). *Wetlands* (3rd ed ed.). NY, USA: John Wiley and Sons.
- Mitášová, H. y Hofierka, J. (1993): Interpolation by regularized spline with tension, II Application to terrain modelling and surface geometry analysis. *Mathematical Geology*, 25:657–669.
- Nahlik, A. M., & Fennessy, M. S. (2016). Carbon Storage in US Wetlands. *Nature Communications*. Recuperado el 19 de 11 de 2018, de <https://www.nature.com/articles/ncomms13835>
- National Aeronautics and Space Administration. (12 de 4 de 2018). *LVIS Land, Vegetation, and Ice Sensor*. Recuperado el 6 de 7 de 2019, de <https://lvis.gsfc.nasa.gov/Home/index.html>
- National Aeronautics and Space Administration. (12 de 4 de 2018). *LVIS Land, Vegetation, and Ice Sensor*. Recuperado el 6 de 7 de 2019, de Costa Rica 2005: <https://lvis.gsfc.nasa.gov/Data/Maps/CR2005Map.html>

Nelson, A.; Reuter, H.I. y Gessler, P. (2009): DEM Production methods and sources». En: Tomislav Hengl y Hannes I.

Reuter (Eds.), Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Elsevier Science, Amsterdam, pp. 65-85.

Organización para Estudios Tropicales. (1991). *Historia Natural de Costa Rica*. (D. H. Janzen, Ed., & M. Chavarría A, Trad.) San José, CR: Editorai Ide la Universidad de Costa Rica. Recuperado el 11 de 7 de 2019, de <https://www.acguanacaste.ac.cr/historia-natural-costa-rica/Historia-natural-de-Costa-Rica-Editado-por-Daniel-H-Janzen-1991.pdf>

Philip, G. M. y D. F. Watson. "A Precise Method for Determining Contoured Surfaces." Australian Petroleum Exploration Association Journal 22: 205–212. 1982.

Programa Nacional de Humedales. (2017). *Política Nacional de Humedales*. GEF-PNUD. Recuperado el 19 de 11 de 2018, de <https://presidencia.go.cr/wp-content/uploads/2017/03/Politica-Nacional-de-Humedales-1.pdf>

Proyecto Humedales de SINAC-PNUD-GEF. (2018). *Inventario Nacional de Humedales Costa Rica*. SINAC/PNUD/GEF, San José, Costa Rica.

REES W. G. (2000). The accuracy of digital elevation interpolated to higher resolution. International Journal of Remote Sensing, (1), pp. 7-20

Secretaría de la Convención de Ramsar. (3 de 2015). Estado de los humedales del mundo y de los servicios que prestan a las personas: una recopilación de análisis recientes. *Nota informativa*. Recuperado el 12 de 7 de 2019, de <https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/bn7s.pdf>

Sistema Nacional de Áreas de Conservación SINAC. (30 de 4 de 2014). V Informe Nacional al Convenio sobre Diversidad Biológica, Costa Rica . CR. Recuperado el 12 de 7 de 2019, de <https://www.cbd.int/doc/world/cr/cr-nr-05-es.pdf>

Soto, M. (3 de 3 de 2017). Palo Verde celebra con aves su rehabilitación. *La Nación*. Recuperado el 9 de 7 de 2019, de <https://www.nacion.com/ciencia/medio-ambiente/palo-verde-celebra-con-aves-su-rehabilitacion/GE3K6CEIZ5FHJNBJ5F32ELKQKA/story/>

The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2003). Good Practice Guidance for Land Use, Land Use Change and Forestry. (J. Penman, M. Gytarsky, T. Hiraishi, T. Krug, D. Kruger, R. Pipatti, . . . F. Wagner, Edits.) Japón: IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme. Recuperado el 13 de 7 de 2019, de https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpoglulucf/gpoglulucf_files/GPG_LULUCF_FULL.pdf

The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). Grassland. En T. I. (IPCC), *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (Vols. 4. Agriculture, Forestry and Other Land Use, págs. 6.1-6.49). Recuperado el 13 de 7 de 2019, de https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/4_Volume4/V4_06_Ch6_Grassland.pdf
USGS. (s.f.). doi:10.5066/F76W992G

Watson, D. F., and G. M. Philip. "A Refinement of Inverse Distance Weighted Interpolation." *Herramienta de geoprocesamiento* 2:315–327. 1985

Willmott, C.J. 1982. Some comments on the evaluation of model performance. Bull. Am. Meteorol. Soc. 63:1309-1313. doi:10.1175/1520-0477(1982)063<1309:SCOTEO>2.0.CO;2

Wise, S. (2000): Assessing the quality for hydrological applications of digital elevation models derived from contours. *Hydrological processes*, 19: 1909-1929.

ANEXOS

Anexo 1. Metadato de datos LVIS

LVIS Data Structure (LDS) Descriptions

Date Created: 2006/04/17

Byte Order:

- All data items are Big Endian unless otherwise noted.

Reference Frame:

- International Terrestrial Reference Frame (ITRF 2000) / WGS-84 Ellipsoid.

GeneralNotes:

- A release is comprised of two or more file types sharing a common origin. All files within the release have equal record numbers, and correspond to one another laser shot for shot. (i.e. record 1000 in the .lge file will be the same laser shot as record 1000 in the .lce file for a given data set)

LVIS Canopy Elevation (.lce) File Description:

Item	Byte Size	Format	Units	Item Description
lfid	4	ulong		LVIS file identification
shotnumber	4	ulong		laser shot assigned during collection
time	8	double	seconds	UTC decimal seconds of the day
tlon	8	double	degrees	longitude of the highest detected return (degrees east)
tlat	8	double	degrees	latitude of the highest detected return (degrees north)
zt	4	float	meters	elevation of the highest detected return (m) (i.e., zg + rh100 - see below)
Total	28			bytes per record

LVIS Ground Elevation (.lge) File Description:

Item	Byte Size	Format	Units	Item Description
lfid	4	ulong		LVIS file identification
shotnumber	4	ulong		laser shot assigned during collection
time	8	double	seconds	UTC decimal seconds of the day
glon	8	double	degrees	longitude of the lowest detected mode within the waveform (degrees east)
glat	8	double	degrees	latitude of the lowest detected mode within the waveform (degrees north)
zg	4	float	meters	mean elevation of the lowest detected mode within the waveform (m)
rh25	4	float	meters	height (relative to zg) at which 25% of the waveform energy occurs (m)
rh50	4	float	meters	height (relative to zg) at which 50% of the waveform energy occurs (m)
rh75	4	float	meters	height (relative to zg) at which 75% of the waveform energy occurs (m)
rh100	4	float	meters	height (relative to zg) at which 100% of the waveform energy occurs (m)
Total	44			bytes per record

LVIS Geolocated Waveform (.lgw) File Description:

Item	Byte Size	Format	Units	Item Description
lfid	4	ulong		LVIS file identification
shotnumber	4	ulong		laser shot assigned during collection
time	8	double	seconds	UTC decimal seconds of the day
lon0	8	double	degrees	longitude of the highest sample of the waveform (degrees east)

lat0	8	double	degrees	latitude of the highest sample of the waveform (degrees north)
z0	4	float	meters	elevation of the highest sample of the waveform (m)
lon431	8	double	degrees	longitude of the lowest sample of the waveform (degrees east)
lat431	8	double	degrees	latitude of the lowest sample of the waveform (degrees north)
z431	4	float	meters	elevation of the lowest sample of the waveform (m)
sigmean	4	float	counts	signal mean noise level, calculated in-flight (counts)
wave	432	byte	counts	return waveform, recorded in-flight (counts)
Total	484			bytes per record

Anexo 2. Información de sensor Sentinel-2 y productos descargados en GloVis.

[Earth Resources Observation and Science \(EROS\) Center](#)

USGS EROS Archive - Sentinel-2

The European Space Agency's Multispectral Instrument on the Sentinel-2 satellite provides global (from 83 degrees north 56 degrees south latitude) 10-meter resolution, multispectral images every 10 days (2015-present).

The Sentinel fleet of satellites is designed to deliver land remote sensing data that are central to the European Commission's Copernicus program. The Sentinel-2 mission is the result of close collaboration between the European Space Agency (ESA), the European Commission, industry, service providers, and data users. The mission has been designed and built by a consortium of around 60 companies led by Airbus Defence and Space, and supported by the CNES French space agency to optimize image quality and by the DLR German Aerospace Centre to improve data recovery using optical communications.

The Sentinel-2 mission consists of two satellites developed to support vegetation, land cover, and environmental monitoring. The Sentinel-2A satellite was launched by ESA on June 23, 2015, and operates in a sun-synchronous orbit with a 10-day repeat cycle. A second identical satellite (Sentinel-2B) was launched March 7, 2017 and is operational with data acquisitions available on [EarthExplorer](#). Together they cover all Earth's land surfaces, large islands, and inland and coastal waters every five days.

The Sentinel-2 [MultiSpectral Instrument](#) (MSI) acquires 13 spectral bands ranging from Visible and Near-Infrared (VNIR) to Shortwave Infrared (SWIR) wavelengths along a 290-km orbital swath.

The MSI sensor data are complementary to data acquired by the U.S. Geological Survey (USGS) Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) ([Comparison of Sentinel-2 and Landsat](#)). A collaborative effort between ESA and the USGS provides for the public access and redistribution of global acquisitions of ESA's Sentinel-2 data at no cost through secondary U.S.-based portals, in addition to direct user access from ESA.

Spectral Bands and Resolution

The MSI measures reflected radiance through the atmosphere within 13 spectral bands.

The spatial resolution is dependent on the particular spectral band:

- 4 bands at 10 meter: blue (490 nm), green (560 nm), red (665 nm), and near-infrared (842 nm).
- 6 bands at 20 meter: 4 narrow bands for vegetation characterization (705 nm, 740 nm, 783 nm, and 865 nm) and 2 larger SWIR bands (1,610 nm and 2,190 nm) for applications such as snow/ice/cloud detection or vegetation moisture stress assessment.
- 3 bands at 60 meter: mainly for cloud screening and atmospheric corrections (443 nm for aerosols, 945 nm for water vapor, and 1375 nm for cirrus detection).

SENTINEL-2 Radiometric and Spatial Resolutions

Band Number	Central Wavelength (nm)	Bandwidth (nm)	Spatial Resolution (m)
1	443	20	60
2	490	65	10
3	560	35	10
4	665	30	10
5	705	15	20
6	740	15	20
7	783	20	20
8	842	115	10
8a	865	20	20
9	945	20	60
10	1375	30	60
11	1610	90	20
12	2190	180	20
TCI*	RGB	Composite	10

*Data acquired after December 5, 2016 include a full resolution True-Colour Image as an RGB (red, green, blue) composite image created from bands 4, 3, 2.

The [USGS Spectral Characteristics Viewer](#) helps users determine which spectral bands work best to identify their features of interest for image interpretation. This tool also facilitates the visualization of the Relative Spectral Response (RSR) of various satellite sensors.

Processing Level

The partnership between ESA and the USGS allows for the distribution of [Level-1C](#) top-of-atmosphere (TOA) reflectance data. Level-1C processing includes radiometric and geometric corrections along with orthorectification to generate highly accurate geolocated products.

Data Products

The USGS Earth Resources Observation and Science (EROS) Center repackages Sentinel-2 products on a per tile basis while preserving the [Sentinel Standard Archive Format for Europe](#) (SAFE) format specification, which allows for the distribution of a user-friendly file size that is approximately 650 MB. Each Level-1C product is a 100 km x 100 km tile with a UTM/WGS84 (Universal Transverse Mercator/World Geodetic System 1984) projection and datum. The Sentinel-2 tiling grid is referenced to the U.S. Military Grid Reference System ([MGRS](#)). Tiles can be fully or partially covered by image data. Partially covered tiles correspond to those at the edge of the swath. The download package from the USGS includes one file for each of the 13 spectral bands plus metadata.

Update: Data acquired after December 5, 2016 are distributed from ESA in a single tile basis with a shorter naming convention and include a full-resolution True-Colour Image. Previously offered Sentinel-2 data in the EROS archive will be replaced as data with the True-Colour Image become available from ESA. Users may see temporary scene duplication in search results.

Products are available for download in a zip file, which includes image data, quality indicators, auxiliary data, and metadata. Sentinel image data are in Geographic Markup Language JPEG2000 (GMLJP2) format. GML provides the encoding necessary for

georeferencing the image. Sentinel-2 data are intended for scientific use within a Geographic Information System (GIS) or other special application software that supports the GMLJP2 format. ESA offers the Sentinel 2 Toolbox, an open source software product, for the visualization, analysis, and processing of GMLJP2 files/Sentinel-2 data and other high-resolution remote sensing data.

Full Resolution Browse (FRB) images in Georeferenced Tagged Image File Format (GeoTIFF) are also available from the USGS for Sentinel-2 tiles. This product is a simulated natural color composite image created from three selected bands (11, 8A, 4) with a ground resolution of 20 meters.

All Sentinel-2 data products are provided free of charge to all data users, including the general public, and scientific and commercial users under the terms and conditions prescribed by the European Commission's Copernicus Programme.

Fuente: (USGS, s.f.)

