

UNIVERSIDAD NACIONAL

TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**ESTIMACIÓN DE CARBONO EN PLANTACIONES DE *Pinus patula* MEDIANTE
EL ANÁLISIS ESPECTRAL DE UNA IMAGEN SATELITAL SENTINEL-2,
DISTRITO DE LUYA VIEJO, AMAZONAS, 2018**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AMBIENTAL**

AUTOR

Bach. Miguel Enrique Mendoza Chichipe

ASESOR

Ing. Rolando Salas López

CHACHAPOYAS - PERÚ

2018

**UNIVERSIDAD NACIONAL
TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS**



**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**ESTIMACIÓN DE CARBONO EN PLANTACIONES DE *Pinus patula* MEDIANTE
EL ANÁLISIS ESPECTRAL DE UNA IMAGEN SATELITAL SENTINEL-2,
DISTRITO DE LUYA VIEJO, AMAZONAS, 2018**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AMBIENTAL**

AUTOR

Bach. Miguel Enrique Mendoza Chichipe

ASESOR

Ing. Rolando Salas López

CHACHAPOYAS - PERÚ

2018

DEDICATORIA

A MI FAMILIA

Carlos Alberto Mendoza Aguilar y Serbia Chichipe Bustos mis padres, a Juan Carlos Mendoza Chavez, Jose Luis Mendoza Chichipe y Javier Antony Mendoza Chichipe mis hermanos, que gracias a su sacrificio, comprensión y consejos han hecho posible mi formación y realización profesional.

Por ser mi fuerza e inspiración.

A MIS AMIGOS

A todas esas personas, compañeros y docentes que en el transcurso de mi carrera han aportado de diferentes maneras

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi familia quienes a lo largo de toda mi vida han apoyado y motivado mi formación académica, creyendo en mí en todo momento y sin dudar de mis capacidades y habilidades.

Agradezco también a mi asesor Ing. Rolando Salas López por su orientación desde la elaboración hasta la culminación de esta investigación. Al Instituto de Investigación para el Desarrollo Sustentable de Ceja de Selva (INDES-CES), al laboratorio de GEOMÁTICA donde realicé la etapa de ejecución y procesamiento de la información de esta investigación. A mis amigos, quienes me apoyaron y motivaron para la finalización de esta tesis.

Finalmente un eterno agradecimiento a esta casa superior de estudios la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas por darme la oportunidad de formarme en sus diferentes ambientes y a todas las personas que de alguna manera me ayudaron a ser un Ingeniero Ambiental.

AUTORIDADES UNIVERSITARIAS

Dr. Policarpio Chauca Valqui
Rector

Dr. Miguel Ángel Barrena Gurbillón
Vicerrector Académico

Dra. Flor Teresa García Huamán
Vicerrectora de Investigación

M.Sc. Edwin Adolfo Díaz Ortiz
Decano de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental

M. Sc. Rosalynn Yohanna Rivera López
Directora de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental

VISTO BUENO DEL ASESOR

El docente de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas que suscribe, hace constar que he asesorado la realización de la tesis **titulada “Estimación de carbono en plantaciones de *Pinus patula* mediante el análisis espectral de una imagen satelital Sentinel-2, distrito de Luya Viejo, Amazonas, 2018”** del tesista egresado de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental:

Bach. Miguel Enrique Mendoza Chichipe

El docente de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas que suscribe, da el Visto Bueno al Informe Final de la tesis en mención, dándole pase para que sea sometida a la revisión por el Jurado Evaluador, comprometiéndome a supervisar el levantamiento de observaciones para su posterior sustentación.

Chachapoyas, enero de 2018.

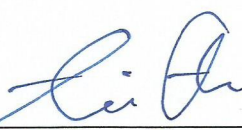


Ing. Rolando Salas López
Asesor de tesis

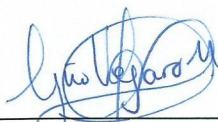
JURADO EVALUADOR



Dr. Carlos Alberto Amasifuen Guerra
Presidente



M. Sc. Lenín Quiñones Huatangari
Secretario



M. Sc. Gino Alfredo Vergara Medina
Vocal



ANEXO 2-N

ACTA DE EVALUACIÓN DE SUSTENTACIÓN DE LA TESIS

En la ciudad de Chachapoyas, el día 28 de Enero del año 2019, siendo las 12.00 horas, el aspirante: Miguel Enrique Mendoza Chichipe defiende públicamente la Tesis titulada: Estimación de Carbono en plantaciones de Pinus patula mediante el análisis espectral de una imagen satelital Sentinel-2, distrito de Luya Viejo, Amazonas, 2018 para optar el Título Profesional en Ingeniería Ambiental otorgado por la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, ante el Jurado, constituido por:
 Presidente : Carlos Alberto Amasifuen Guerra
 Secretario : Benin Quiñones Huatunpari
 Vocal : Eino Alfredo Vergara Medina



Procedió el (los) aspirante (s) a hacer la exposición de los antecedentes, contenido de la tesis y conclusiones obtenidas de la misma, haciendo especial mención de sus aportaciones originales. Terminada la defensa de la tesis presentada, los miembros del jurado pasaron a exponer su opinión sobre la misma, formulando cuantas cuestiones u objeciones consideran oportunas, las cuales fueron contestadas por el los aspirante (s).

Tras la intervención de los miembros del jurado y las oportunas contestaciones del aspirante, el Presidente abre un turno de intervenciones para los miembros del jurado presentes en el acto, a fin de que formulen las cuestiones u objeciones que consideren pertinentes.

Seguidamente, a puerta cerrada, el jurado determinará la calificación global concedida a la tesis, en términos de:

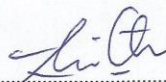
Notable o sobresaliente () Aprobado () No apto ()

Otorgada la calificación el presidente del Jurado comunica, en sesión pública, la calificación concedida. A continuación se levanta la sesión.

Siendo las horas 13.02 del mismo día, el jurado concluye el acto de sustentación del Trabajo de Investigación.



PRESIDENTE



SECRETARIO



VOCAL

OBSERVACIONES:

.....

.....



ANEXO 2-0

DECLARACIÓN JURADA DE NO PLAGIO

Yo Miguel Enrique Mendoza Chichipe
identificado con DNI N° 70812580 Estudiante de la Escuela Profesional de
Ingeniería Civil y Ambiental
Facultad de Ingeniería Ambiental
de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Amazonas.

DECLARO BAJO JURAMENTO QUE:

1. Soy autor de la Tesis titulada: Estimación de Carbono en plantaciones de Pinus patula mediante el Análisis Espectral de una imagen satelital Sentinel-2, distrito de Luya Viejo, Amazonas
La misma que presento para optar: Título Profesional de Ingeniero Ambiental
2. La tesis no ha sido plagiada ni total ni parcialmente, para la cual se han respetado las normas internacionales de citas y referencias para las fuentes consultadas.
3. La tesis presentada no atenta contra derechos de terceros.
4. La tesis no ha sido publicada ni presentada anteriormente para obtener algún grado académico previo o título profesional.
5. Los datos presentados en los resultados son reales, no han sido falsificados, ni duplicados, ni copiados.

Por lo expuesto, mediante la presente asumo toda responsabilidad que pudiera derivarse por la autoría, originalidad y veracidad del contenido de la tesis, así como por los derechos sobre la obra y/o invención presentada. Asimismo, por la presente me comprometo a asumir además todas las cargas pecuniarias que pudieran derivarse para LA UNTRM en favor de terceros por motivo de acciones, reclamaciones o conflictos derivados del incumplimiento de lo declarado o las que encontraren causa en el contenido de la tesis.

De identificarse fraude, piratería, plagio, falsificación o que el trabajo de investigación haya sido publicado anteriormente; asumo las consecuencias y sanciones civiles y penales que de mi acción se deriven.

Chachapoyas, 11 de enero de 2019



TABLA DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
AUTORIDADES UNIVERSITARIAS	v
VISTO BUENO DEL ASESOR	vi
JURADO EVALUADOR	vii
ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS	viii
DECLARACIÓN JURADA DE NO PLAGIO	iv
TABLA DE CONTENIDOS	x
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xiv
I. INTRODUCCIÓN	1
II. MATERIALES Y MÉTODOS	3
2.1. Ubicación del área de estudio.....	3
2.2. Materiales.....	3
2.3. Metodología.....	4
III. RESULTADOS	11
3.1. Concentración de Carbono Aéreo (CA).....	11
3.2. Comportamiento espectral.....	13
3.3. Modelo matemático.....	14
IV. DISCUSIÓN	15
V. CONCLUSIONES	18
VI. RECOMENDACIONES	19
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	20
ANEXOS	27
Anexo 1. Información dasométrica de <i>Pinus patula</i>	28
Anexo 2. Bandas espectrales que conforman la Imagen satelital Sentinel-2.....	29
Anexo 3. Coordenadas de punto de muestreo con sus respectivas firmas espectrales.....	30
Anexo 4. Procesamiento de las bandas espectrales de la imagen satelital Sentinel-2.....	31
Anexo 5. Análisis de regresión de los datos espectrales y Carbono Aéreo.....	32
Anexo 6. Panel fotográfico de las medidas y observaciones en campo.....	33

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación de área de estudio.....	3
Figura 2. Mapa de localización de los puntos de muestreo (<i>P. patula</i>).....	5
Figura 3. Bandas espectrales con diferentes tonalidades de Grises.....	8
Figura 4. Puntos de muestreo (<i>P. patula</i>) en la imagen satelital.....	10
Figura 5. Firma espectral del pixel respectivo de 10 m de resolución.....	10
Figura 6. Concentración de carbono de <i>P. patula</i> en base a la edad y número de muestreo.....	12
Figura 7. Concentración de Carbono Aéreo (CA) promedio por cada edad evaluada.....	12
Figura 8. Reflectancia del <i>P. patula</i> con respecto a cada edad evaluada.....	13
Figura 9. Datos estadísticos generados en el programa Statistix 8.....	14

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Bandas espectrales a procesar.....	7
Tabla 2. Concentración de CA en <i>P. patula</i> en base al DAP.....	11
Tabla 3. Rango de firmas espectrales de las Bandas Espectrales.....	13
Tabla 4. Estadística descriptiva del Carbono Aéreo (CA), datos espectrales (B4, B8 y NDVI).....	14

RESUMEN

El dióxido de carbono (CO₂) se emite a la atmósfera de forma natural y por actividades antropogénicas. Este gas de efecto invernadero es generado principalmente por la oxidación del carbono orgánico de los fósiles, uso de combustibles y la deforestación. Su concentración está aumentando en la atmósfera, ocasionando el calentamiento global. Los sistemas forestales tienen beneficios ambientales y económicos por los bonos económicos de carbono, por ende, es importante determinar la concentración. El trabajo de investigación se realizó con el objetivo de estimar la concentración de carbono en plantaciones de pino (*Pinus. patula*) mediante el análisis espectral de la imagen satelital Sentinel-2. El área de estudio fue el distrito de Luya Viejo, provincia de Luya, departamento de Amazonas. Para realizar esta investigación, primero se recopiló información del Diámetro de Altura de Pecho (DAP) de 30 individuos *P. patula* de 7, 10 y 20 años. Estos datos fueron usados para determinar la concentración de Carbono Aéreo (CA) de los mismos, en base a una ecuación alométrica. Posteriormente, y mediante el uso del software ENVI 5.3., se extrajo la información espectral (reflectancia) de cada pino mediante el análisis espectral de la imagen satelital Sentinel-2, y se procesaron las bandas espectrales del azul (B2), verde (B3), rojo (B4), infrarrojo (B8) y el Índice de vegetación (NDVI). La información de la imagen satelital y dasométrica fueron tomadas en los meses de octubre y noviembre del 2017 respectivamente. Se estimó en promedio 45.54 KgC/pino y 409.86 tCha⁻¹ que equivale a 1,502.55 tCO₂ha⁻¹. El modelo matemático que mejor se ajusta para estimar el Carbono Aéreo es la ecuación lineal $CA (kg) = 1805.06 - 16113*B4 + 1626.1*B8 - 2157.39*NDVI$, $r^2=0.62$. Se concluye que las imágenes de satélite nos permiten estimar la biomasa y cuantificación de carbono arbóreo aéreo.

Palabras claves: Teledetección, *Pinus patula*, reflectancia, carbono aéreo.

ABSTRACT

Carbon dioxide (CO₂) is emitted into the atmosphere naturally and by anthropogenic activities. This greenhouse gas is generated mainly by the oxidation of organic carbon from fossils, fuel use and deforestation. Its concentration is increasing in the atmosphere, causing global warming. Forest systems have environmental and economic benefits from carbon credits, so it is important to determine concentration. The research work was carried out with the objective of estimating the carbon concentration in pine plantations (*Pinus. Patula*) through the spectral analysis of the Sentinel-2 satellite image. The study area was the Luya Viejo district, Luya province, department of Amazonas. To carry out this investigation, we first collected information on the Breast Height Diameter (DBH) of 30 *P. patula* individuals of 7, 10 and 20 years old. These data were used to determine the concentration of Air Carbon (CA) of the same, based on an allometric equation. Subsequently, and through the use of the ENVI 5.3 software, the spectral information (reflectance) of each pine was extracted through the spectral analysis of the Sentinel-2 satellite image, and the spectral bands of blue (B2), green (B3) were processed.), red (B4), infrared (B8) and the Vegetation Index (NDVI). The information of the satellite and dasometric image were taken in the months of October and November of 2017 respectively. It was estimated on average 45.54 KgC / pine and 409.86 tCha⁻¹ which is equivalent to 1,502.55 tCO₂ha⁻¹. The mathematical model that best fits to estimate air carbon is the linear equation $CA (kg) = 1805.06 - 16113 * B4 + 1626.1 * B8 - 2157.39 * NDVI$, $r^2 = 0.62$. It is concluded that satellite images allow us to estimate the biomass and quantification of aerial arboreal carbon..

Key words: Remote sensing, *Pinus patula*, reflectance, aerial carbon.

I. INTRODUCCIÓN

Se estima que la concentración atmosférica de Dióxido de Carbono (CO₂) será aproximadamente 450 ppm para el año 2035, lo que da como resultado una probabilidad de 77–99% de superar el calentamiento global de 2 °C (Santori *et al.*, 2018). Esto se debe a que el CO₂ es el gas de efecto invernadero más importante puesto que contribuye en un 55% con el calentamiento global (Guerra-Santos *et al.*, 2014). El incremento del CO₂ se atribuye principalmente a las emisiones provocadas por las actividades humanas, como el uso de combustibles fósiles (Aguinaco, 2008) y los procesos derivados del cambio en el uso del suelo (Ordóñez *et al.*, 2008).

El incremento de la temperatura global ocasionada por el efecto invernadero, es responsable de diferentes problemas ambientales (Diaz, 2012). Por ejemplo, ocasiona el cambio de tendencia en las precipitaciones; afectando a los sistemas naturales vinculados al hielo, a los sistemas hidrológicos, calidad de las aguas, la diversidad biológica (Gross, 2012), así como a la productividad agrícola y forestal (Luis, 2013). De hecho, la productividad forestal está altamente afectado, por la disminución de su cobertura a causa de la deforestación, el cual incrementaría debido a la presión por bienes y servicios que ejercerá el crecimiento demográfico (Mora y Sale, 2011). Los bosques y los árboles son importantes sumideros de carbono (Pacheco-Aquino *et al.*, 2014), puesto que absorben el CO₂ de la atmósfera y lo almacenan como carbono (C) (FAO, 2010). Por lo tanto, para proponer estrategias viables dirigidas a la mitigación del cambio climático es imprescindible conocer la dinámica del Carbono en los ecosistemas forestales, y esto se hace en base a la información sobre la concentración de carbono en tales ecosistemas (Ordóñez y Masera, 2001).

La información sobre la biomasa es fundamental para evaluar la cantidad de carbono fijado por las masas vegetales. Este es uno de los servicios ambientales de los bosques y árboles que presenta un alto potencial económico (FAO, 2006). Debido a la incertidumbre de calcular la concentración de carbono a través de la biomasa, surge la Teledetección como técnica encargada de obtener información de la superficie de la tierra a través de la Percepción Remota (PR). Mediante el uso de sensores ópticos satelitales y los productos radar (Reyna-Bowen, 2010). La Percepción Remota integrada con los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y el Geoposicionamiento global (GPS)

(Aguilar, 2015), conforman una herramienta valiosa de apoyo para las estimaciones en la cuantificación de la Biomasa Aérea y de su dinámica (Rosenqvist *et al.*, 2003).

Cada elemento de la superficie terrestre, ofrece una forma particular de reflejar o emitir la radiación electromagnética, dependiendo de sus propiedades físico- químicas y las variabilidades que ésta presenta, según la zona del espectro que analicemos. Esa variabilidad se manifiesta en la denominada “curva espectral” o “firma espectral” propia de cada objeto (Palma, 2011). Una vez que la energía electromagnética llega a la superficie terrestre, interactúa con cada tipo de material ya sea por reflexión, absorción o transmisión, de acuerdo a un patrón de respuesta espectral particular (Sobrino *et al.*, 2004; Gonzaga, 2014). Este comportamiento distintivo de cada tipo de material es aprovechado en procesos de clasificación de imágenes, siendo común referirse a él como “firma espectral” (Palma, 2011).

Existen metodologías para usar la percepción remota en estudios dirigidos a la estimación de biomasa y carbono. Muchos de ellos usan píxeles individuales, o grupos de ellos como unidad de análisis. Entre estos métodos están los paramétricos, como el ajuste de modelos matemáticos mediante regresión entre las variables de interés y los datos espectrales de las imágenes de satélite (Hall *et al.*, 2006). Por lo tanto, los datos obtenidos por medio de la Percepción Remota pueden ser útiles para la estimación indirecta del valor de la biomasa/carbono (Martínez *et al.*, 2016), el cual debe ser complementada en campo, con mediciones de variables dasométricas y utilizando ecuaciones empíricas de biomasa (Zianis y Mencuccini, 2004). En este sentido, investigaciones como las de Aguirre-Salado *et al.* (2009), Sánchez *et al.* (2016) y Martínez *et al.* (2016), cuantificaron la Biomasa y el contenido de Carbono de especies forestales diferentes, los cuales usaron y procesaron información adquiridas de imágenes del satélite SPOT, datos Lidar e imágenes Landsat, logrando obtener buenos resultados en las estimaciones de la Biomasa forestal.

El presente estudio describe la aplicación de la imagen del satélite Sentinel-2, con respecto a la respuesta espectral que tiene la cobertura vegetal. La investigación consistió en estimar la concentración de carbono almacenado en la Biomasa Aérea de plantaciones de pino (*Patula patula*) mediante el análisis espectral de la imagen satelital y el uso de datos dasométricos. Esta información permitió la predicción y determinación de almacenamiento de carbono de la Biomasa Aérea de dicha especie forestal.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Ubicación del área de estudio

La investigación se realizó en el distrito de Luya Viejo; provincia de Luya, departamento de Amazonas. Tiene una extensión de 1192.17 ha. Esta localidad presenta un clima húmedo y templado frío, con una temperatura entre 10°C y 16°C. La zona de vida que presenta es un Bosque seco – Montano bajo tropical (GOREA y IIAP, 2007). Las plantaciones de pino *Pinus patula* se encuentra ubicado en el sector Vasquezpampa, perteneciente a la Comunidad Campesina de Luya Viejo (Figura 1).

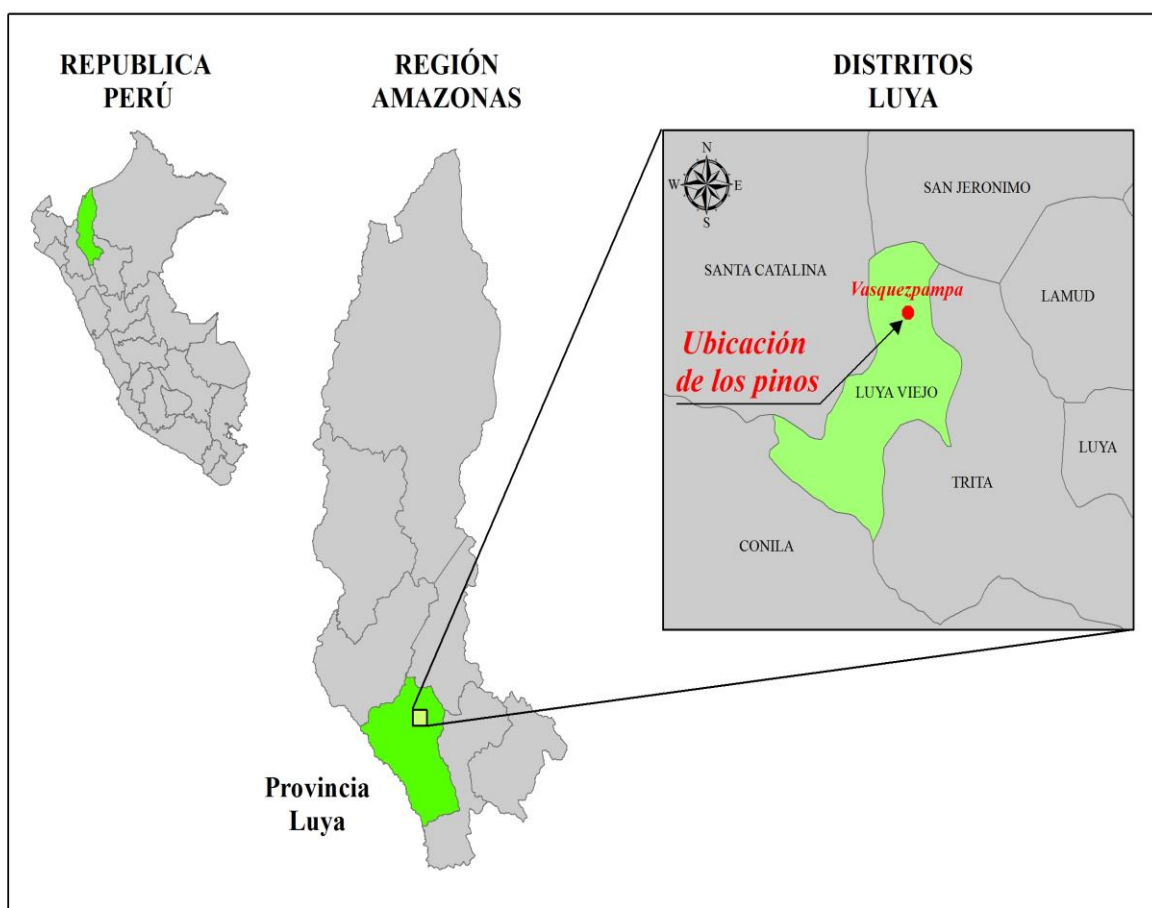


Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio

2.2. Materiales

Material de investigación

- Se estudió el sistema forestal de pino (*P. patula*) en el distrito de Luya Viejo, provincia de Luya.

Material cartográfico y satelital

- Carta Nacional del Instituto Geográfico Nacional (IGN) escala 1:100000 (13H)
- Capa vectorial de los límites provinciales, distritales del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI)
- Capa vectorial de Zonificación Económica Ecológica Amazonas (ZEE)
- Imágenes satelitales del sensor Sentinel-2

Materiales y equipos

- Libreta de campo, GPS Garmin Montana 650, precisión 3m, Cámara fotográfica

Para el procesamiento de imágenes se utilizó:

- Computadora con procesador i7

Programas

- ArcGIS v. 10.3., QGIS v. 2.18.7, Google Earth., MapSource v. 6.3., Microsoft Office v. 2013, ENVI 5.3., Statistix 8

2.3. Metodología

a. Fase preliminar- recolección de información

Se utilizó información dasométrica de 30 individuos de pino (Figura 2), recolectadas el 12 y 21 de noviembre del año 2017. Asimismo, se realizó la descarga de la imagen satelital Sentinel-2 de fecha 21 de octubre del año 2017. En campo se estableció 30 cuadrantes de 10 x 10 m, encontrándose dentro de ella 9 plantas de pino. De las cuales se tomó como muestra la planta o individuo que se encontraba en el centro. Luego se realizó las medidas y georreferenciación correspondiente de las muestras. Los datos dasométricos se recolectaron en campo pocos días después de la obtención de la imagen satelital, con el propósito que las informaciones sean cuasi simultáneas y que los resultados posteriores sean los más precisos posibles.

Para la obtención de la imagen satelital Sentinel-2, se mantuvo constante monitoreo de la página web de *land viewer* visualizador gratuito de imágenes de satélite (<https://eos.com/landviewer/>), el cual contiene y publica dichas imágenes multitemporales.

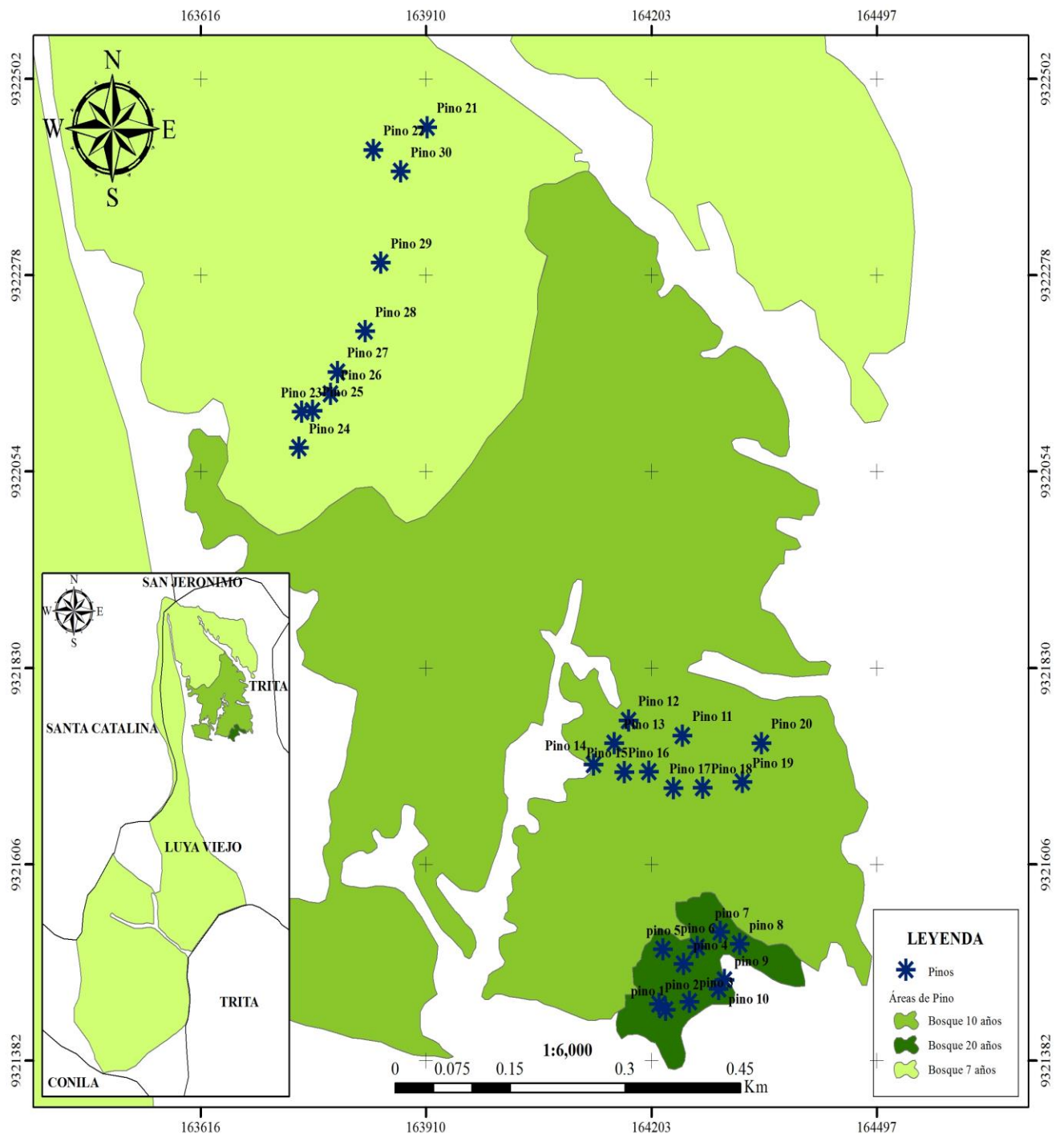


Figura 2. Mapa de localización de puntos de muestreo

En la Figura 2, se observa los puntos de muestreo y las extensiones de las plantaciones de *P. patula* de diferentes edades de 7; 10 y 20 años con 2.02; 44.61 y 541.52 Ha. respectivamente. Extensión total de 588.33 ha.

b. Concentración de Carbono Aéreo (CA) de las plantaciones de pino en base a la información dasométrica

Para establecer la concentración de CA se utilizó la siguiente información:

- **Diámetro de Altura de Pecho (DAP) y Biomasa Aérea (BA)**

Esta información se obtuvo del muestreo que fue realizado el 12 y 21 de noviembre del 2017 (Anexo 2), que consistió en extraer medidas a 30 plantas de *P. patula*, diez de cada edad. Se midió la altura de cada pino con el uso de un distanciómetro y la Circunferencia a la Altura de Pecho (CAP) Esta medida fue convertida en DAP a partir de la fórmula de (Villarreal *et al.*, 2006):

$$DAP = \frac{CAP}{\pi} \dots\dots\dots [Ec. 1]$$

Para la estimación de la Biomasa Aérea (BA) se aplicó la ecuación alométrica modificada de Oliva *et al.* (2017).

$$BA = 2.5361 * DAP^{1.1794}, \text{ con } r^2 = 0,91 \dots\dots\dots [Ec. 2]$$

- **Carbono Aéreo (CA) del *P. patula***

El CA se obtuvo multiplicando la Biomasa Aérea por el factor 0.5, el cual significa que el 50% de la biomasa del árbol es C (Díaz-Franco *et al.*, 2007; Acosta-Mireles *et al.*, 2009).

$$CA = BA * 0.5 \dots\dots\dots [Ec. 3]$$

c. Procesamiento de la imagen satelital Sentinel-2

La imagen satelital Sentinel-2 obtenida comprende 13 Bandas Espectrales. Esta imagen presenta ciertas distorsiones al momento de su percepción remota, por la cual se realizaron las correcciones correspondientes.

- **Corrección Radiométrica y Atmosférica**

Se realizó la corrección radiométrica y atmosférica aplicando la corrección *DOSI* o Substracción de Objeto Oscuro (Congedo, 2015),

cual permitió convertir los datos radiales a reflectancia, procesos necesarios ya que existen una serie de distorsiones de las señales de radiación electromagnética percibidas por los sensores satelitales generados por los gases y aerosoles (Aguilar *et al.*, 2014). Este proceso se ejecutó en el programa QGIS, donde la corrección radiométrica y atmosférica se aplicó a todas las Bandas Espectrales de la imagen satelital Sentinel-2, por la cual el programa utiliza la Data Base de la imagen, que consiste en las características en el momento de la captación del satélite.

Posteriormente se generó una imagen multiespectral en el programa ArcGis 10.3 mediante la combinación de Bandas 2, 3, 4 (Espectro visible) y 8 (Infrarrojo cercano). Además se generó una imagen de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI (Figura 3) mediante la herramienta Calculadora Raster ArcGIS con el uso de la Ecuación 4. La selección de las bandas espectrales en mención, se debe a que son de más alta resolución que las otras bandas de la imagen satelital, además son las más usadas respecto a las investigaciones de referencia debido a que son capaces de detectar los cambios físicos y químicos de la cobertura vegetal.

$$NDVI = \frac{B8-B4}{B8+B4} \dots\dots\dots [Ec.4]$$

Tabla 1. Bandas espectrales a procesar

BANDAS	DESCRIPCIÓN	APLICACIÓN
B2	Azul	Para diferenciar entre el suelo y vegetación, clasificar distintos cubiertos boscosos, por ejemplo las coníferas
B3	Verde	Para evaluar el vigor de la vegetación sana, midiendo su pico de reflectancia (o radiación) verde
B4	Rojo	Banda de absorción de clorofila, muy útil para la clasificación de la cubierta vegetal
B8	Infrarrojo Cercano (NIR)	Es útil para determinar el contenido de biomasa

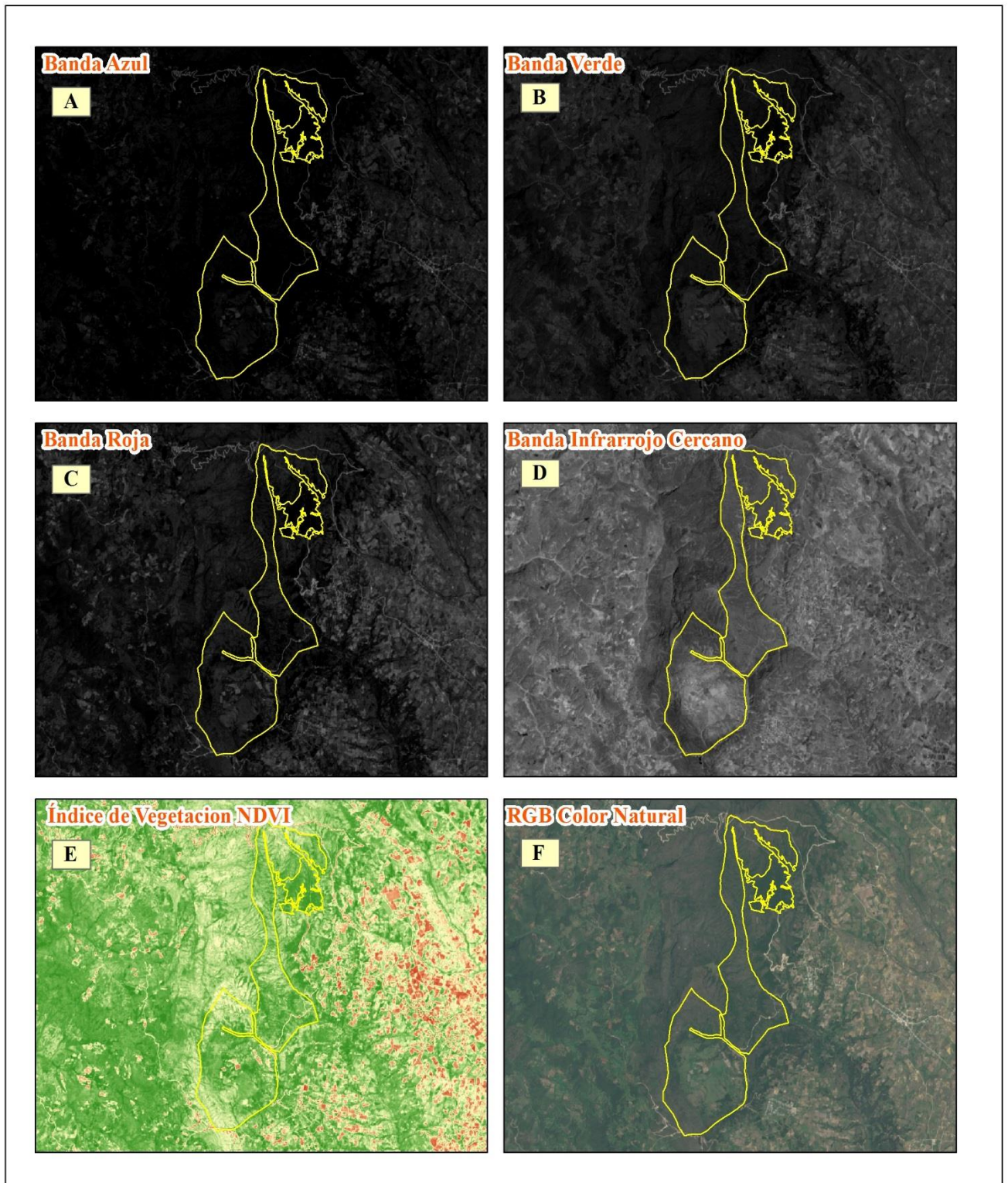


Figura 3. Bandas espectrales por separado con diferentes tonalidades de Grises (A, B, C y D) de 10m de resolución, Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (E) y la combinación de bandas para el color natural (F)

- **Corrección Geométrica**

Este proceso consistió en la transformación de las coordenadas de los píxeles de la segunda imagen de tal forma que coincidiera de manera precisa con la imagen de referencia. Se realizó mediante una transformación polinomial de segundo grado que se obtiene a partir de un conjunto de pares de puntos de control de ambas imágenes. Se acomodó la imagen satelital con respecto a la forma de la tierra, se utilizaron los Puntos de Control Terrestre (GCPs) extraídos en campo con el uso de un Sistema de Posicionamiento Global (GPS Garmin). En esta etapa se usó el programa ENVI 5.3., utilizando las Bandas Espectrales seleccionadas.

d. Evaluación de las firmas espectrales de las plantaciones de pino

Análisis espectral de la imagen satelital Sentinel-2

Las firmas espectrales de la imagen satelital Sentinel-2 es un valor numérico que depende de la radiación almacenada en el pixel de la imagen. Además, son niveles de energía de la radiancia intrínseca del objeto de estudio (Aguilar *et al.*, 2014). Los niveles digitales varían de acuerdo a las características de la resolución de las bandas de la imagen y de la longitud de onda que tiene cada cobertura terrestre, en este caso del comportamiento biofísico de la plantación de *P. patula*. En esta etapa se procesó la imagen multiespectral con las bandas B2, B3, B4, B8 y la imagen de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). El proceso de extracción de la firma espectral (reflectancia) de las bandas se realizó con el programa ENVI 5.3., (Figura 4 y 5). Se localizó el pixel en la imagen satelital Sentinel-2 de acuerdo a los puntos de muestreo georeferenciados de cada plantación de pino. Para esto se realizaron los siguientes pasos: [*Herramientas* > *Perfiles* > *Perfil Z ((Spectrum))*]. En la imagen se puede observar el orden de las bandas de la siguiente manera: 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 corresponde a las bandas espectrales 2, 3, 4 y 8 respectivamente. Además, los valores espectrales del NDVI se extrajeron en el programa ArcGIS.

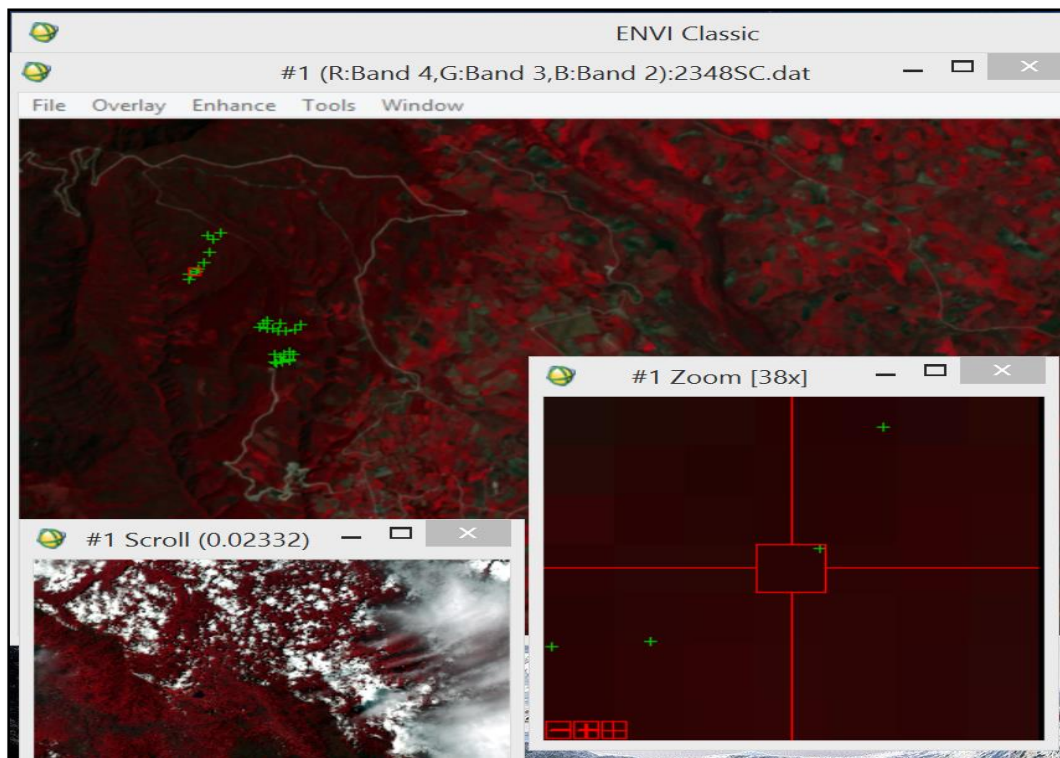


Figura 4. Puntos de muestreo (*P. patula*) en la imagen satelital para extraer su información espectral. Los puntos de muestreo se observa de color verde los cuales están georeferenciados en el área de estudio

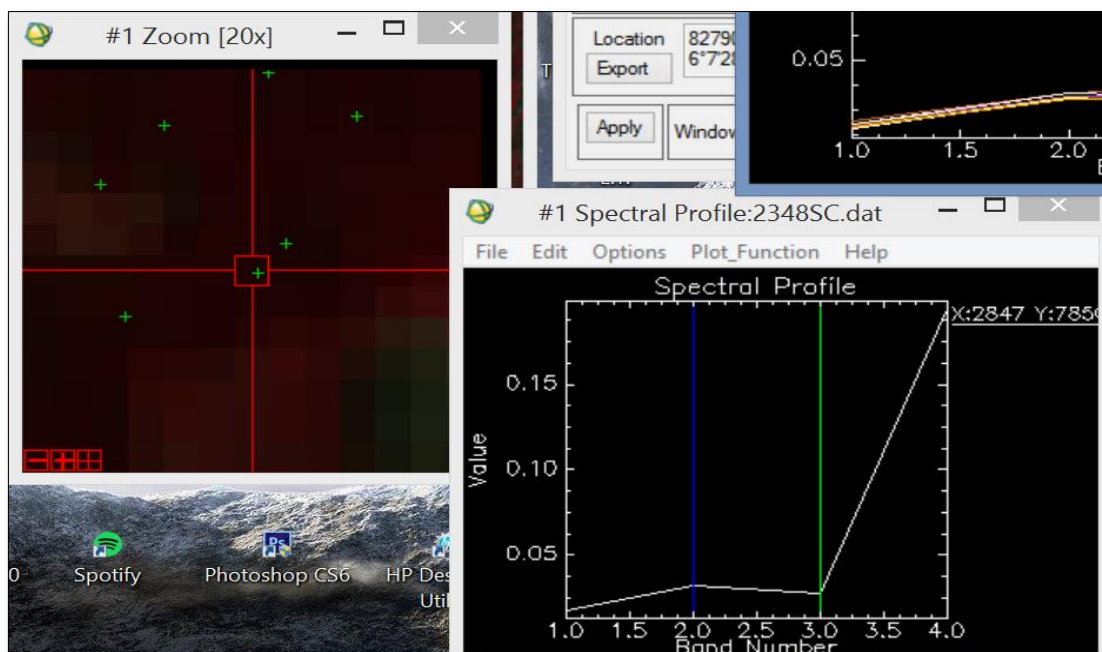


Figura 5. Firma espectral del pixel respectivo de 10 m de resolución. Se observa los niveles espectrales de acuerdo a la reflectancia que determina la especie forestal *P. patula* en cada Banda Espectral

e. Análisis de datos para la obtención del modelo matemático

Para la formulación del modelo matemático se hizo un análisis estadístico que consiste en pruebas de regresión múltiple, con el objetivo de definir la mejor relación (r^2) entre la concentración de carbono de las plantaciones de pino y los datos espectrales de la imagen satelital Sentinel-2. Se utilizó el programa estadístico Statistix 8. Se trabajó con los 30 datos de CA y la información espectral de cada punto de muestreo.

III. RESULTADOS

3.1. Concentración de Carbono Aéreo (CA)

Las alturas de los pinos variaron desde 5.94 - 17.07 metros con promedio 10.9 ± 3.29 m, asimismo el diámetro DAP resultaron entre 12.73 - 33.42 cm con un promedio de 20.72 ± 5.13 cm. De acuerdo a la ecuación alométrica usada, se obtuvieron las concentraciones de carbono en cada uno de los pinos evaluados, teniendo como dato de partida la Circunferencia a la Altura de Pecho (CAP), se observa concentraciones entre 25.49 - 79.55 KgCA/Pino, con un promedio de 45.54 ± 13.27 KgCA/Pino (Tabla 2).

Tabla 2. Concentración de CA en P. patula en base al DAP

EDAD (años)	N° PINO	ALTURA H (m)	CAP (cm)	DAP (cm)	BIOMASA AÉREA (kg)	CARBONO AÉREO (kg)
20	1-10	13.3 - 17.07	69 - 105	21.96 - 33.42	96.97 - 159.11	48.48 - 79.55
10	11-20	10.4 - 11.99	59 - 78	18.78 - 24.83	80.62 - 112.06	40.31 - 56.03
7	21-30	5.94 - 8.14	40 - 55	12.73 - 17.51	50.98 - 74.21	25.49 - 37.11

Además, en algunos puntos, la concentración de carbono en las plantas de menor edad es similar y mayor a los de más edad de desarrollo (Figura 6). También observamos que los pinos de acuerdo a su crecimiento y desarrollo tienden a almacenar más Carbono (58.09; 47.63 y 30.9 Kg) (Figura 7).

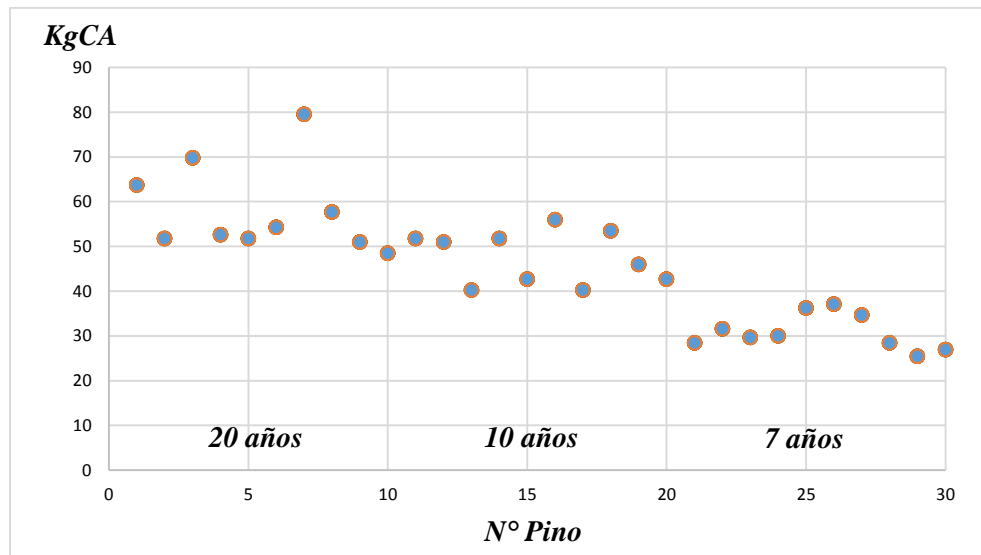


Figura 6. Concentración de carbono de *P. patula* en base a la edad y número de muestreo

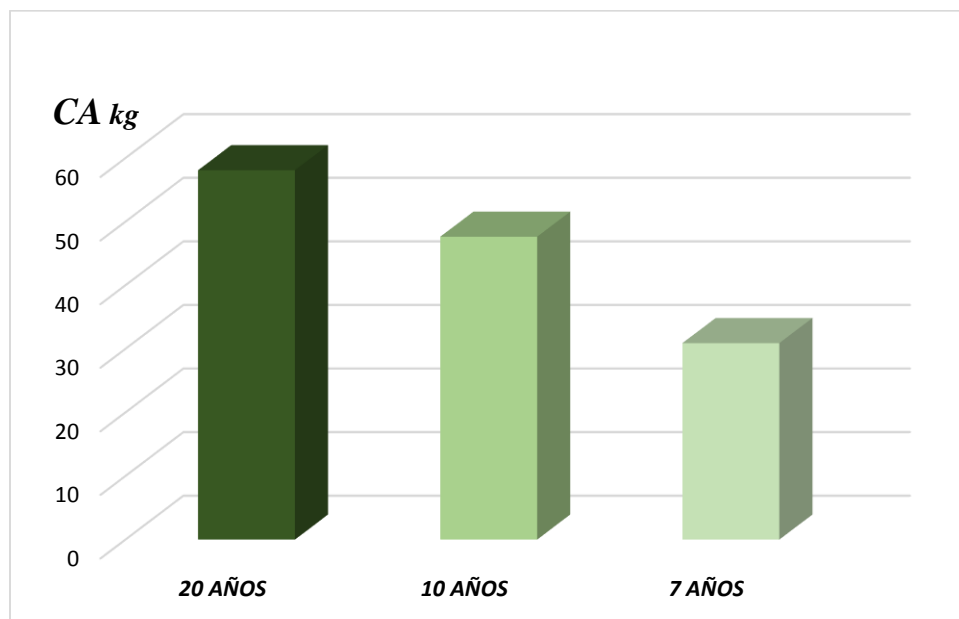


Figura 7. Concentración de Carbono Aéreo (CA) promedio por cada edad evaluada

En base a la cantidad de CA encontrado por plantación de pino se reportó 409,860 Kg.C/ha equivalente a 1,498,880.76 Kg.CO₂/ha y 241,132,933.8 kg.CA en todo el sistema de plantaciones de *P. patula* en el distrito de Luya Viejo. Para encontrar la concentración de CO₂ se utilizó el factor de conversión 3,666, resultado de la división entre el peso molecular del CO₂ (44) y el peso molecular del carbono (12), para la proyección de CO₂.

3.2. Comportamiento espectral

Como resultado del análisis de la imagen satelital, en la Tabla 3 se observa los datos cuantitativos espectrales de cada cuadrante o pinos muestreados captados por el satélite Sentinel-2, obtenido mediante el análisis espectral y las coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM) respectivas de cada muestra. Los datos espectrales de las Bandas varían entre 0.015 - 0.27 %, el NDVI siempre se muestra en valores entre 0 - 1, reportándose en este caso datos entre 0.66 - 0.83.

Tabla 3. Rango de firmas espectrales de las Bandas Espectrales

Edad (años)	Nº Pino	BANDA 2	BANDA 3	BANDA 4	BANDA 8	NDVI
20	1-10	0.016-0.019	0.031-0.033	0.025-0.038	0.19-0.21	0.66-0.77
10	11-20	0.015-0.02	0.031-0.036	0.023-0.031	0.2-0.24	0.75-0.83
7	21-30	0.016-0.022	0.035-0.041	0.026-0.039	0.21-0.27	0.69-0.80

En la Figura 8, se observa el comportamiento espectral de la especie forestal *P. patula*, donde la reflectancia es mayor en la banda verde y en el infrarrojo cercano. Además los valores de reflectancia de los pinos de 7 años resultaron mayores a los pinos de 10 y 20 años.

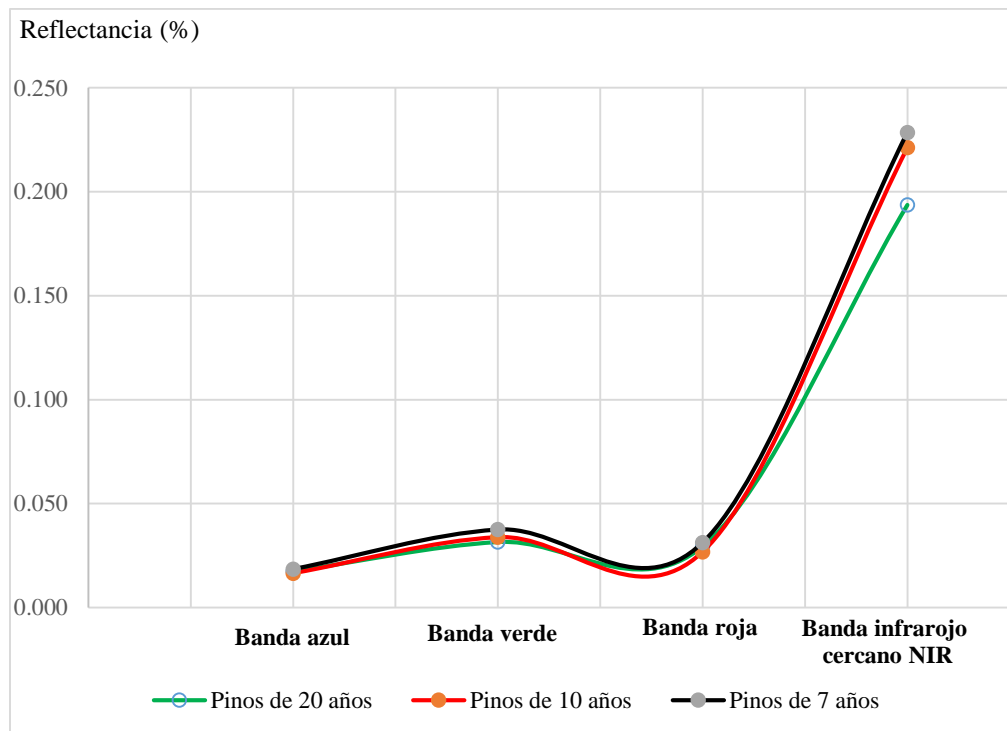


Figura 8. Reflectancia del *P. patula* con respecto a cada edad evaluada

3.3. Modelo matemático

La ecuación se construyó en base a 30 unidades muestrales de pino, se evaluó la concentración CA y las informaciones espectrales de cada Banda de la imagen satelital sentinel-2 y del NDVI.

En la Tabla 4, se observar los valores máximos y mínimos de la reflectancia (firma espectral), donde la desviación estándar muestra la cercanía o similitud de los datos. Por lo contrario, los valores de Carbono Aéreo son más lejanos o diferentes reflejado en su desviación estándar de 13.27.

Tabla 4. Estadística descriptiva del Carbono Aéreo (CA) y de los datos espectrales (B4, B8 y NDVI)

Variable	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Est.
CA	25.49	79.55	45.54	13.27
B4	0.023	0.040	0.029	0.004
B8	0.186	0.268	0.214	0.019
NDVI	0.663	0.825	0.759	0.037

De acuerdo a la regresión lineal múltiple se obtuvo el mejor modelo matemático (Ecuación 5), este caso una ecuación lineal, de la cual se determinó que las Bandas espectrales 4, 8, y el NDVI en base a su grado de significancia resultaron ser los que más explican el comportamiento de la concentración de carbono. Resultando con un grado de relación de 61.8% y con significancia menor a 0.01 (Figura 9).

$$CA(kg) = 1805.06 - 16113 * B4 + 1626.1 * B8 - 2157.39 * NDVI$$

[Ec. 5]

Unweighted Least Squares Linear Regression of CA						
Predictor Variables	Coefficient	Std Error	T	P	VIF	
Constant	1805.06	461.562	3.91	0.0006		
B4	-16113.0	4340.59	-3.71	0.0010	123.6	
B8	1626.10	585.181	2.78	0.0100	50.1	
NDVI	-2157.39	604.659	-3.57	0.0014	190.8	
R-Squared	0.6181		Resid. Mean Square (MSE)		75.0017	
Adjusted R-Squared	0.5741		Standard Deviation		8.66035	
Source	DF	SS	MS	F	P	
Regression	3	3156.71	1052.24	14.03	0.0000	
Residual	26	1950.04	75.00			
Total	29	5106.75				
Cases Included	30	Missing Cases	0			

Figura 9. Datos estadísticos generados en el programa Statistix 8, donde (P) es la significancia, (Coefficient) son las constantes y (R-Squared) es la relacion r^2

IV. DISCUSIÓN

Para la obtención de la concentración de Carbono Aéreo en pino *P. patula*, se utilizó la ecuación alométrica generada por Oliva, *et al.* (2017), en la cual el diámetro a la altura de pecho (DAP) es la variable que mejor se relaciona con la estimación de biomasa (Acosta y Tupaz, 2007). Investigaciones como las de Díaz-Franco (2007) con *Pinus patula* y Winck (2015) con *Eucalyptus grandis*, utilizaron modelos alométricos en base al DAP para estimar la biomasa de dichos rodales. El uso de estos modelos alométricos es bastante aceptado para cuantificar la biomasa forestal (Paky *et al.*, 2017).

Analizando los datos dasométricos (DAP y altura) se verificó que éstos aumentan de acuerdo a la edad de la planta de pino, de tal forma que aumenta su biomasa (Fonseca *et al.*, 2008). Esto se debe a que las plantas para su desarrollo y crecimiento adquieren el dióxido de carbono atmosférico para convertirlos en carbohidratos a través de la fotosíntesis y así aumentar su tejido vegetal (Jaramillo, 2004). Este patrón se refleja en lo reportado en esta investigación, donde la cantidad de carbono almacenado (30.9; 47.63 y 58.09 Kg/pino) aumenta en función de la edad de la planta (por ejemplo, plantas 20 años presentaron mayor cantidad de carbono que aquellas de 10 y 7 años). Similar patrón presentó Lopez-Reyes (2016), quien obtuvo alto almacenamiento de carbono en los arboles de hule (*Hevea brasiliensis*) de mayor edad (51 años) y que va relacionado con la mayor biomasa. Sin embargo, Ajit *et al.* (2013), mencionan que la capacidad de captura de carbono atmosférico tiende a disminuir en relación al incremento de la edad de las plantaciones, en edades tempranas o intermedias es más alta la captura de carbono. La concentración promedio de Carbono Aéreo en esta investigación fue 45.54 KgCA/pino que se determinaron en base al DAP con 20.72 cm. Estos resultados son similares a los de Oliva *et al.* (2017), quienes reportaron un total de Carbono Aéreo de 30,99 kg por planta de *P. patula*, y como las de Díaz-Franco (2007), quien reportó una concentración mayor de 113 KgC por planta de la misma especie con 20 cm de DAP. Datos inferiores reportó Flores (2012), con concentración máxima de 13.25 kg Carbono Aéreo en *Pinus cembroides*. De forma general se determinó que en el sistema forestal de pino del distrito de Luya Viejo hay un total de 409.86 tCA/ha, equivalente a 1498.88 tCO₂/Ha. Este dato de la concentración de carbono por hectárea es similar a los de (Rodríguez-

Larramendi *et al.*, 2016), quienes determinaron la concentración de carbono en árboles de pino, encino, roble y ocote, siendo la primera con el potencial más alto de captura con 380.113 tCA/ha. Otra investigación desarrollado por Schlegel (2001) también muestra resultados semejantes, con cantidad de carbono entre 423.86 y 662.06 tC/ha en un bosque de Chile con 12 especies diferentes. Cantidades menores reportaron investigaciones como las de Ordóñez *et al.* (2008), Rodríguez-Laguna *et al.* (2009) y Aguirre-Salado *et al.* (2009), que encontraron concentraciones de 220,7 - 266.9 tC/ha, 110 tC/ha y 22.24 tC/ha respectivamente. Las variaciones de las cantidades de almacenamiento de carbono se debe a las diferentes formas de distribución de siembra de los rodales, ya que determina la densidad de los sistemas forestales (Sandoval *et al.*, 2013).

La radiación solar interactúa predominantemente con el follaje del árbol; por lo tanto, las imágenes ópticas contienen información del nivel superior del dosel del bosque (Galidaki *et al.*, 2017). De acuerdo al análisis espectral a la imagen satelital Sentinel-2 a través del procesamiento de cada uno de sus bandas espectrales y del NDVI, el cual consistió en la verificación y extracción de la firma espectral (reflectancia), se observa que cada muestra de pino tiene una información espectral diferente de acuerdo a la banda utilizada. Esta variación espectral se debe a la composición o el estado del vegetal que incide en la cantidad de energía, por ende, la reflectancia es una magnitud característica del medio y, por tanto, es esta magnitud la base para el reconocimiento de sustancias y es determinada por la longitud de onda (Alonso *et al.*, 1999), el cual está registrada en la imagen de satélite. Asimismo, Meer y Jong (2002), indican que la firma espectral de una planta muestra las características y el comportamiento de la radiación electromagnética con la estructura de la planta. Este comportamiento es debido a que sus componentes físicos y químicos producen señales distintivas (Peña, 2009). Según Alonso y Moreno citado por Palma (2011), en la vegetación, los factores como el tipo de pigmento (clorofila, xantofilas, carotenos), estructura de la hoja y el contenido de humedad son los que principalmente modifican la reflectancia incidiendo sobre las longitudes de onda. Asimismo, Chuvieco (1995) en base a varias investigaciones sobre las curvas espectrales del espectro electromagnético, menciona que el comportamiento típico de la vegetación vigorosa muestra una reducida reflectividad en las bandas visibles con un máximo

relativo en la porción verde del espectro. Por lo contrario, en el infrarrojo cercano presenta una elevada reflectividad. Estas características espectrales se relacionan principalmente con la acción de los pigmentos fotosintéticos y del agua que almacenan las hojas (Brizuela-Amador, 2007). De todo eso se afirma que la interacción de la radiación solar con las células foliares de las plantas define la reflectancia en el espectro visible e infrarrojo (Hunt *et al.*, 2013).

En los análisis de regresión los datos espectrales que mejor se relacionó con el contenido de Carbono Aéreo en *P. patula* son de la Banda rojo (B4), Infrarrojo cercano (B8) y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). Esto se debe, a que la radiación tiene gran incidencia en los vegetales, ya que por su composición, la Banda Roja e Infrarroja son los que mayor interacción tienen con la misma (Alonso *et al.*, 1999). Según Simões *et al.* (2005), Powell *et al.* (2010) y Rueda *et al.* (2015), el NDVI es la variable espectral altamente relacionada con los parámetros bioquímicos y agronómicos responsables del desarrollo y la productividad de las plantas. El modelo matemático lineal (Ecuación 4) para encontrar la concentración de Carbono Aéreo se obtuvo en base a las variables espectrales que mejor se adecuaron (B4, B8, y el NDVI), obteniendo una $r^2 = 0.6181$, siendo este un modelo aceptable (Martínez *et al.*, 2009) para la predicción del Carbono Aéreo. Similar resultado como las de Martínez *et al.* (2016) y Aguirre-Salado *et al.* (2009), que reportaron $r^2 = 0.6298$ y 0.7 respectivamente, en las cuales el Índice de Vegetación (NDVI) y las Bandas del Rojo e Infrarrojo cercano fueron las variables que inciden en la determinación del Carbono Aéreo. De esta forma, se considera que la teledetección, a través de la utilización de imágenes satelitales es una herramienta, remota importante (Ruiz-Díaz, *et al.*, 2014), que al relacionarlas con datos medidos en campo facilita los trabajos para las estimaciones de biomasa (Balenović, 2015).

V. CONCLUSIONES

El uso del DAP en el modelo alométrico permitió establecer la Biomasa Aérea en *P. patula*, siendo ésta el 50% Carbono. Se logró de esta forma calcular la cantidad de Carbono Aéreo por cada edad evaluada, como también, la cantidad en toda la extensión de las plantaciones de pino. Asimismo, se observó el aumento de concentración de carbono en función al desarrollo y crecimiento de las plantaciones.

El procesamiento y análisis espectral de la imagen satelital ayudó a evaluar el comportamiento de la reflectancia frente a la vegetación (*Pinus patula*), donde la Banda roja (B4) e Infrarrojo cercano (B8) y el Índice de Vegetación (NDVI) determinan el estado en el que se encuentra la biomasa. De esta manera, los procesos bioquímicos y fotosintéticos son los que determinan la cantidad de radiación que llega al receptor (Satélite).

Se logró establecer el modelo matemático, que está expresado en una ecuación lineal, donde la información espectral de la imagen satelital Sentinel-2 explica un 61.8% del comportamiento de la concentración de carbono almacenado en la Biomasa Aérea de la plantación estudiada. Por lo tanto, se al modelo matemático es aceptable para la estimación del Carbono Aéreo en *P. patula*.

Las imágenes procedentes de sensores remotos (ej. Sentinel-2) proporcionan información valiosa que al ser relacionada con datos de campo, permite desarrollar nuevos métodos para la estimación de variables forestales, especialmente biomasa y Carbono Aéreo. Esta información es importante para evaluar la función de los bosques en el secuestro y emisiones de carbono.

VI. RECOMENDACIONES

- Para las futuras investigaciones realizadas por los estudiantes, evaluar el almacenamiento de carbono mediante el uso de la teledetección en diferentes especies forestales incluyendo al suelo, ya que este también tiene la capacidad de adquirir el carbono de la atmósfera, por lo cual sería importante su realización para obtener información completa de los sistemas forestales.
- Integrar y comparar diferentes tipos de sensores (satélites), para así obtener información más detallada de la cobertura vegetal. Asimismo estudiar otro tipo de sustancia en las diferentes coberturas de la tierra, ya sea agua y suelo.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, N. (2015). Percepción remota como herramienta de competitividad de la agricultura. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6, 399–405.
- Aguilar, H., Mora, R. y Vargas, C. (2014). Metodología para la corrección atmosférica de imágenes Aster, Rapideye, Spot 2 y Landsat 8 con el módulo Flash del software ENVI. *Revista Geográfica de América Central*, (53), 39–59. <https://doi.org/10.15359/rgac.2-53.2>
- Aguirre-Salado, C. A., Valdez-Lazalde, J. R., Ángeles-Pérez, G., de los Santos-Posadas, H. M., Haapanen, R. y Aguirre-Salado, A. I. (2009). Mapeo de carbono arbóreo aéreo en bosques manejados de *Pino patula* en Hidalgo, México. *Agrociencia*, 43(2), 209–220.
- Acosta-Mireles, M., Carrillo-Anzures, F. y Diaz Lavariega, M. (2009). Determinación del carbono total en bosques mixtos de *Pinus patula Schl. et Cham. Terra Latinoamericana*, 27(2), 105–114.
- Acosta, J. y Tupaz, F. (2007), “Cuantificación de la captura de carbono por la biomasa aérea de aliso (*Alnus jorullensis*) en dos arreglos agroforestales de la granja experimental botana Universidad de Nariño, Municipio de Pasto, departamento de Nariño”, Universidad de Nariño- Facultad de Ciencias Agrícolas- Colombia. 23-34.
- Aguinaco, J. V. (2008). Captura y almacenamiento de dióxido de carbon, *Terra Latinoamericano*, 27(2), 105-114.
- Alonso, C, Moreno, V. y Rodríguez, E. (1999). Determinación experimental de la firma espectral de la vegetación. Una sencilla práctica de introducción a la teledetección. *Teledetección. Avances y Aplicaciones*. VIII Congreso Nacional de Teledetección, España. 429–432.
- Ajit, Dhyani, S. K., Ramnewaj, Handa, A. K., Prasad, R., Alam, B., Rizvi, R. H., Gupta, G., Pandey, K. K., Jain, A. y Uma. (2013). Modeling analysis of potential carbon sequestration under existing agroforestry systems in three districts of Indo-gangetic plains in India. *Agroforestry Systems*, 87 (5), 1129-1146. doi: 10.1007/s10457-013-9625-x.

- Balenović, I., A. Jazbec, H. Marjanović, E. Paladinić, y D. Vuletić. 2015. “Modeling Tree Characteristics of Individual Black Pine (*Pinus nigra* Arn.) Trees for Use in Remote Sensin Based Inventory.” *Forests* 6(2), 492–509. DOI:10.3390/f6020492
- Brizuela-Amador Pérez, B., Alcántar-González, G., Sánchez-García, P., Pea-
kalra, Y., Crumbaugh, J., Olive, C., Tijerina-Chávez, L. y Maldonado-
Torres, R. (2007). Establecimiento de índices espectrales en el diagnóstico
nutrimental de nitrógeno en maíz. *Agrociencia*, 41 (8), 827-835
- Congedo, L. (2015). Semi-Automatic Classification Plugin Documentation, 106.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2137.4884>
- Chuvieco, E. (1995). Fundamentos de Teledetección Espacial. España, Madrid:
Segunda Edición, 63-66.
- Díaz-Franco, R., Acosta-Mireles, M., Carrillo-Anzures, F., Buendía-Rodríguez,
E., Flores-Ayala, E., y Etchevers-Barra, J. D. (2007). Determinación de
ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula*
Schl. et Cham. Madera y Bosques, 13(1), 25–34.
<https://doi.org/10.21829/myb.2007.1311233>
- Díaz, G. (2012). El cambio climático. *Ciencia y Sociedad*, XXXVII(2), 227–240.
<http://www.redalyc.org/pdf/870/87024179004.pdf>
- FAO. (2010). La gestión de los bosques ante el cambio climático, 20.
<http://www.fao.org/docrep/014/i1960s/i1960s00.pdf>
- FAO. (2006). Resultados del inventario de bosques y árboles 2005-2006.
- Fonseca, G., W., Alice, F., Montero, J., Toruño, H. y Leblanc, H. (2008).
Acumulación de biomasa y carbono en bosques secundarios y plantaciones
forestales de *Vochysia guatemalensis* e *Hieronyma alchorneoides* en el
Caribe de Costa Rica. *Agroforestería en las Américas*, 46: 47-64.
- Flores, N., Mendizábal-Hernández, L. y Alba-Landa, J. (2012). Potencial de
captura y almacenamiento de CO₂ en el Valle de Perote. Estudio de caso:
Pinus cembroides. *Foresta Veracruzana*, 14 (1), 17-22.

- Galidaki, G., Zianis, D., Gitas, I., Radoglou, K., Karathanassi, V., Tsakiri–Strati, M. y Mallinis, G. (2017). Vegetation biomass estimation with remote sensing: focus on forest and other wooded land over the Mediterranean ecosystem. *International Journal of Remote Sensing*, 38(7), 1940–1966. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1266113>
- Gobierno Regional Amazonas e Instituto de Investigación de la Amazonia Peruana (2008). Zonificación ecológica y económica del departamento de Amazonas.
- Gross, J. (2012). Ecological Consequences of Climate Change: Mechanisms, Conservation, and Management by E. A. Beever; J. L. Belant. *The Journal of Wildlife Management*, 76, 1102–1103. DOI:10.2307/41519456.
- Gonzaga, C. (2014). Aplicación de Índices de Vegetación Derivados de Imágenes Satelitales Landsat 7 ETM y ASTER para la Caracterización de la Cobertura Vegetal en la Zona Centro de la Provincia de Loja, Ecuador. Tesis para optar el grado académico de Magister en Geomática Universidad Nacional de la Plata, 26-28.
- Guerra-Santos, J. J., Cerón-Bretón, R. M., Cerón-Bretón, J. G., Damián-Hernández, D. L., Sánchez-Junco, R. C. y Carrió, E. del C. G. (2014). Estimation of the carbon pool in soil and above-ground biomass within mangrove forests in Southeast Mexico using allometric equations. *Journal of Forestry Research*, 25(1), 129–134. <https://doi.org/10.1007/s11676-014-0437-2>
- Jaramillo, V. (2004). El ciclo global del carbono. In: Martínez, J y Fernández, A. (comps.). Cambio climático: una visión desde México. *INE-Semarnat*, 1, 77-85.
- Hall, R. J., Skakun, R. S., Arsenault, E. J. y Case, B. S. (2006). Modeling forest stand structure attributes using Landsat ETM data, Application to mapping of aboveground biomass and stand volume. *Forest Ecology and Management*, 225, 378-390.
- Hunt, E. R., Doraiswamy, P. C., Mcmurtrey, J. E., Daughtry, C. S. T., Perry, E. M. y Akhmedov, B. (2013). *International Journal of Applied Earth*

- Observation and Geoinformation A visible band index for remote sensing leaf chlorophyll content at the canopy scale. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 21, 103–112. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.07.020>
- Luis, U. (2013). El cambio climático: Sus causas y efectos medioambientales, *Real Academia Medicina Cirugia Valladolid*, 50, 71–98.
- Martínez, R., Aguirre, O., Vargas, B., Jiménez, J., Treviño, E. y Yerema, J. (2016). Modelación de biomasa y carbono arbóreo aéreo en bosques del estado de Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7 (35), 91-106.
- Martínez, R., Tuya, L., Martínez, M., Pérez, A. y Cánovas, A. (2009). El coeficiente de correlación de los rangos de Spearman caracterización. *Revista Habanera de Ciencias Médicas*, 8 (2), 3-19.
- Meer, F. y Jong, S. (2002). *Imaging Spectrometry. Remote Sensing and Digital Image Processing*. Kluwe Academic Publishers, 4, 111- 197.
- Mora, C., y Sale, P. F. (2011). Ongoing global biodiversity loss and the need to move beyond protected areas: A review of the technical and practical shortcomings of protected areas on land and sea. *Marine Ecology Progress Series*, 434, 251–266. <https://doi.org/10.3354/meps09214>
- Oliva, M., Culqui Mirano, L., Leiva, S., Collazos, R., Salas, R., Vásquez, H. y Maicelo Quintana, J. L. (2017). Reserve of carbon in a silvopastoral system composed of *Pinus patula* and native herbaceous. *Scientia Agropecuaria*, 8(2), 149–157. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2017.02.07>
- Ordóñez, J. A. B., de Jong, B. H. J., García-Oliva, F., Aviña, F. L., Pérez, J. V., Guerrero, G., Masera, O. (2008). Carbon content in vegetation, litter, and soil under 10 different land-use and land-cover classes in the Central Highlands of Michoacan, Mexico. *Forest Ecology and Management*, 255(7), 2074–2084. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.12.024>
- Ordóñez, J. A. B. y Masera, O. (2001). Captura de carbono ante el cambio climático. *Madera y Bosques*, 7(1), 3–12.

- Pacheco-Aquino, G., Durán E. y Ordóñez-Díaz, J.A.B. (2014). Estimación del carbono arbóreo en el área de manejo forestal de Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México, *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 6(29), 126–145.
- Palma, H. J. H. (2011). Procesamiento digital de imágenes apuntes de clases, 2007.
- Paky, E., Moreno, F., y Álvarez-Dávila, E. (2017). Contenido de carbono en un bosque de tierra firme del resguardo Nonuya-Villazul, Amazonia Colombiana. *Colombia Forestal*, 20(2), 144–157. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2017.2.a04>
- Powell, S. L., Cohen, W. B., Healey, S. P., Kennedy, R. E., Moisen, G. G., Pierce, K. B. y Ohmann, J. L. (2010). Remote Sensing of Environment Quantification of live aboveground forest biomass dynamics with Landsat time-series and field inventory data: A comparison of empirical modeling approaches, *Remote Sensing of Environment*, 114, 1053–1068. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.12.018>
- Peña, M. (2009). Teledetección de vanguardia para el manejo y monitoreo de los recursos naturales del país, *Gestión Ambiental*, 44-47. https://www.researchgate.net/publication/259622476_Teledeteccion_de_vanguardia_para_el_manejo_y_monitoreo_de_los_recursos_naturales_de_l_pais/download
- Reyna-Bowen, L. (2010). Segmentación de imágenes como base para la caracterización hidrológica de la cobertura del suelo, 1, 12-39.
- Rosenqvist, A., Milne, A., Lucas, R., Imhoff, M. y Dobson, C. (2003). A review of remote sensing technology in support of the Kyoto Protocol. *Environmental Science and Policy*, 6(5), 441–455. [https://doi.org/10.1016/S1462-9011\(03\)00070-4](https://doi.org/10.1016/S1462-9011(03)00070-4)
- Rodríguez-Laguna, Rodrigo; Jiménez-Pérez, Javier; Aguirre-Calderón, Óscar A.; Treviño-Garza, Eduardo J. y Razo-Zárata, R. (2009). Estimación de carbono almacenado en el Bosque de Pino-Encino en la reserva de la Biosfera el Cielo, Tamaulipas, México. *Universidad Autónoma Indígena de México*, 5, 317–327.

- Rodríguez-Larramendi, L. A., Guevara-Hernández, F., Reyes-Muro, L., Ovando-Cruz, J., Nahed-Toral, J., Prado-López, M. y Saldaña, C. (2016). Estimación de biomasa y carbono almacenado en bosques comunitarios de la región Frailesca de Chiapas, México, *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(37), 77–94.
- Ruiz-Díaz, C., Rodríguez-Ortiz, G., Leyva-Lopez, J. C., José, Y. y Enríquez-Del Valle, R. (2014). Metodologías para estimar biomasa y carbono en especies forestales de México, *Naturaleza y Desarrollo*, 12(1), 28–45.
- Rueda, F., Peñaranda, L. A., Velásquez, W. L. y Díaz, S. A. (2015). Aplicación de una metodología de análisis de datos obtenidos por percepción remota orientados a la estimación de la productividad de caña para panela al cuantificar el NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada). *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 16(1), 25–40.
- Sandoval, V. H. C., Azpiri, H. S., Hernández, J. J. V. y Sánchez, N. M. (2013). Estrategias de crecimiento y distribución de biomasa en *Pinus pseudostrobus* bajo diferentes condiciones de competencia, *Revista fitotecnica mexicana*, 36(1), 71–79.
- Santori, G., Charalambous, C., Ferrari, M. y Brandani, S. (2018). Adsorption artificial tree for atmospheric carbon dioxide capture, purification and compression, *Energy*, 162, 1158–1168. doi:10.1016/j.energy.2018.08.090
- Sánchez, L. F., Marcos-Robles, J. L., Herrero, E., Hernández, S. y Carrión, P. (2016). Aplicación de tecnologías de teledetección al estudio de biomasa forestal, *Revista Ibérica de Sistemas y Tecnologías de Información*, 19, 61–76. <https://doi.org/10.17013/risti.19.61>
- Schlegel, B (2001). Estimación de biomasa y carbono en bosques del tipo forestal Siempreverde, Universidad Austral de Chile. 1-13.
- Simões, M., Rocha, J. y Lamparelli R.A. (2005). Spectral variables, growth analysis and yield of sugarcane, *Scientia Agricola*, 62(3), 199-207.

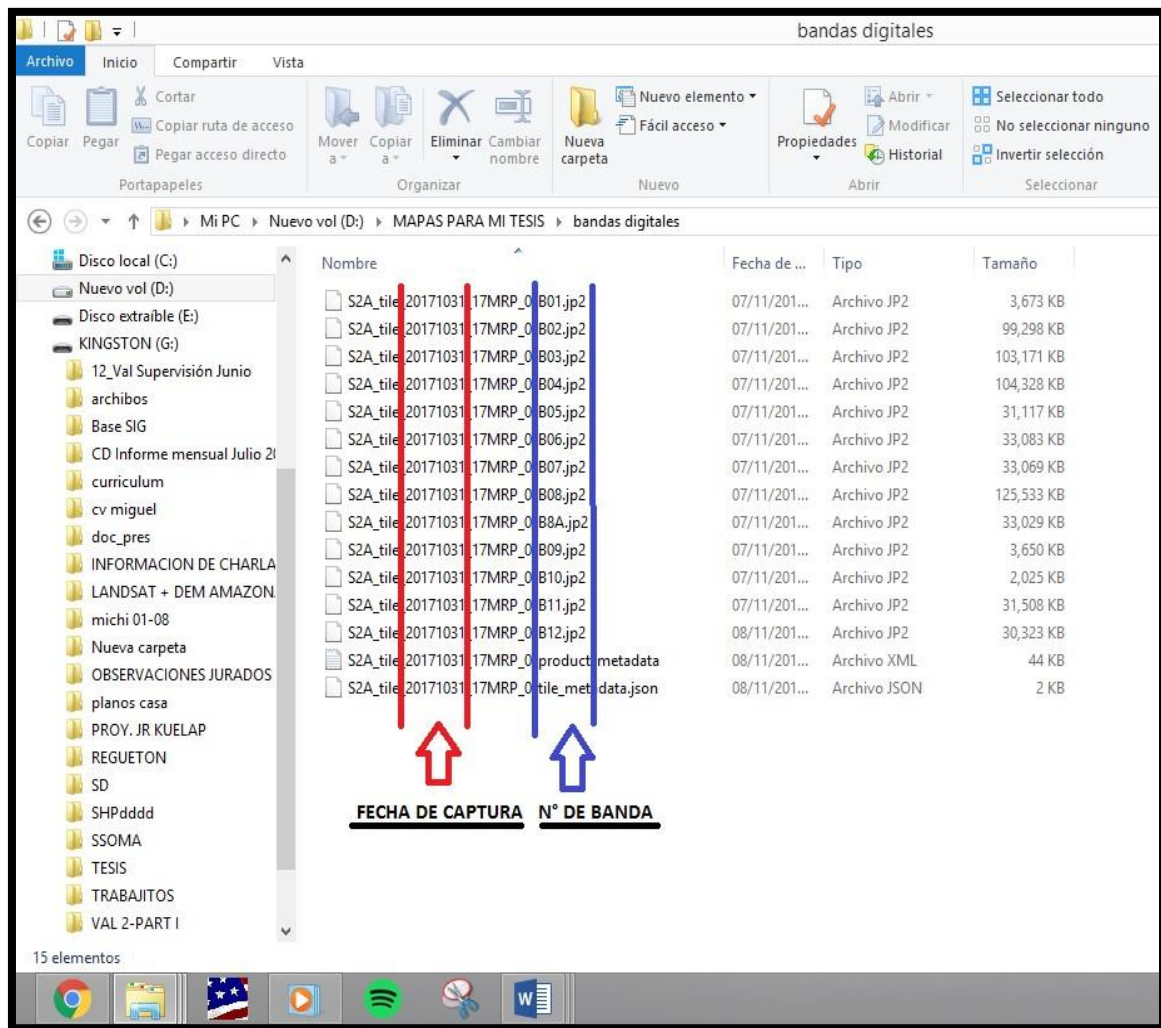
- Sobrino, J.; Jiménez-Muñoz, J. C. y Paolini, L. (2004). Recuperación de la temperatura de la superficie terrestre de Landsat TM 5. *Remote Sensing of Environment*, (90), 434-440.
- Villarreal, H., Álvarez, M., Córdoba, S., Escobar, F., Fagua, G., Gast, F. y Umaña, A. M. (2006). Métodos para el análisis de datos: una aplicación para resultados provenientes de caracterizaciones de biodiversidad. Manual de Métodos para el desarrollo de inventarios de Biodiversidad, 21–235.
- Winck R. A., Fassola H. E., Barth S. R., Crechi E. H., Keller A. E., Videla D. y Zaderenko C. (2015). Modelos predictivos de biomasa aérea de *Eucalyptus grandis* para el noreste de Argentina. *Ciencia Florestal, Santa Maria*, 25(3), 595-606. <https://doi.org/10.5902/1980509819611>
- Zianis, D. y Mencuccini, M. (2004). On simplifying allometric analyses of forest biomass. *Forest Ecology and Management*, 187(2–3), 311–332. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2003.07.007>

ANEXOS

Anexo 1. Información dasométrica de *Pinus patula*, de fecha 12 y 21 de noviembre del 2017

EDAD	N° PINO	ALTURA H (m)	CAP (cm)	DAP (cm)	BIOMASA AÉREA (kg)	CONCENTRACIÓN DE CARBONO (kg)
20 AÑOS	1	17.07	87.00	27.69	127.46	63.73
	2	13.3	73.00	23.24	103.63	51.82
	3	13.48	94.00	29.92	139.64	69.82
	4	15.13	74.00	23.55	105.31	52.65
	5	15.01	73.00	23.24	103.63	51.82
	6	13.55	76.00	24.19	108.67	54.34
	7	13.39	105.00	33.42	159.11	79.55
	8	15.4	80.00	25.46	115.45	57.73
	9	16.35	72.00	22.92	101.96	50.98
	10	13.55	69.00	21.96	96.97	48.48
10 AÑOS	11	11.99	73.00	23.24	103.63	51.82
	12	10.4	72.00	22.92	101.96	50.98
	13	11.23	59.00	18.78	80.62	40.31
	14	10.8	73.00	23.24	103.63	51.82
	15	10.83	62.00	19.74	85.48	42.74
	16	11.3	78.00	24.83	112.06	56.03
	17	10.44	59.00	18.78	80.62	40.31
	18	11.3	75.00	23.87	106.99	53.49
	19	11.26	66.00	21.01	92.02	46.01
	20	11.08	62.00	19.74	85.48	42.74
7 AÑOS	21	7.33	44.00	14.01	57.04	28.52
	22	7.55	48.00	15.28	63.21	31.60
	23	8.14	45.50	14.48	59.34	29.67
	24	7.2	46.00	14.64	60.11	30.06
	25	6.46	54.00	17.19	72.62	36.31
	26	5.94	55.00	17.51	74.21	37.11
	27	7.71	52.00	16.55	69.46	34.73
	28	6.99	44.00	14.01	57.04	28.52
	29	6.63	40.00	12.73	50.98	25.49
	30	6.16	42.00	13.37	54.00	27.00

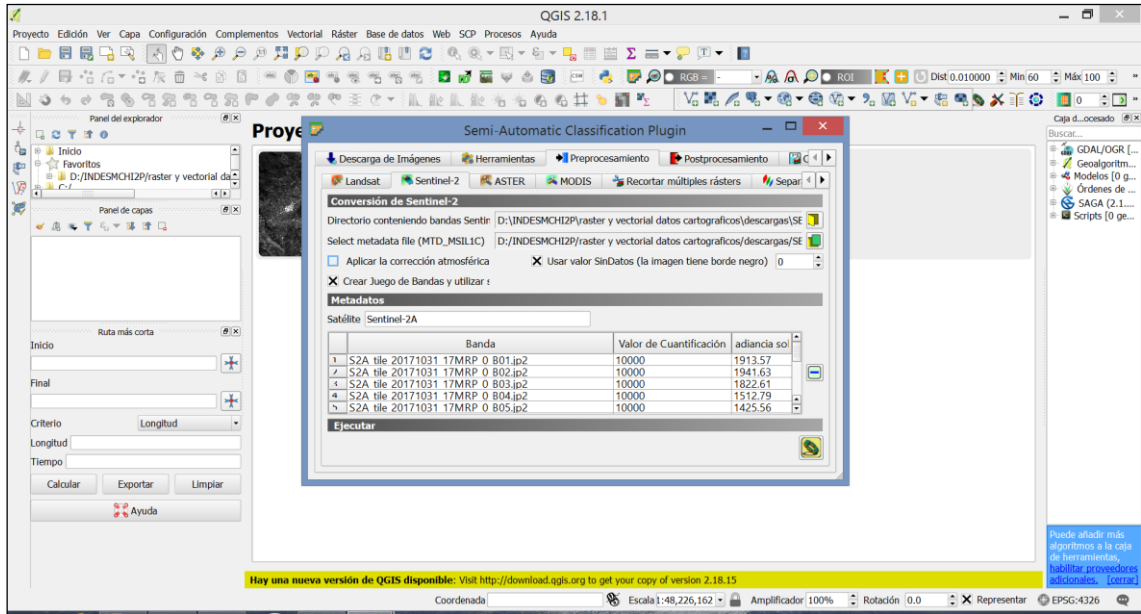
Anexo 2. Bandas espectrales que conforman la Imagen satelital Sentinel-2 de fecha 10 de octubre del 2017



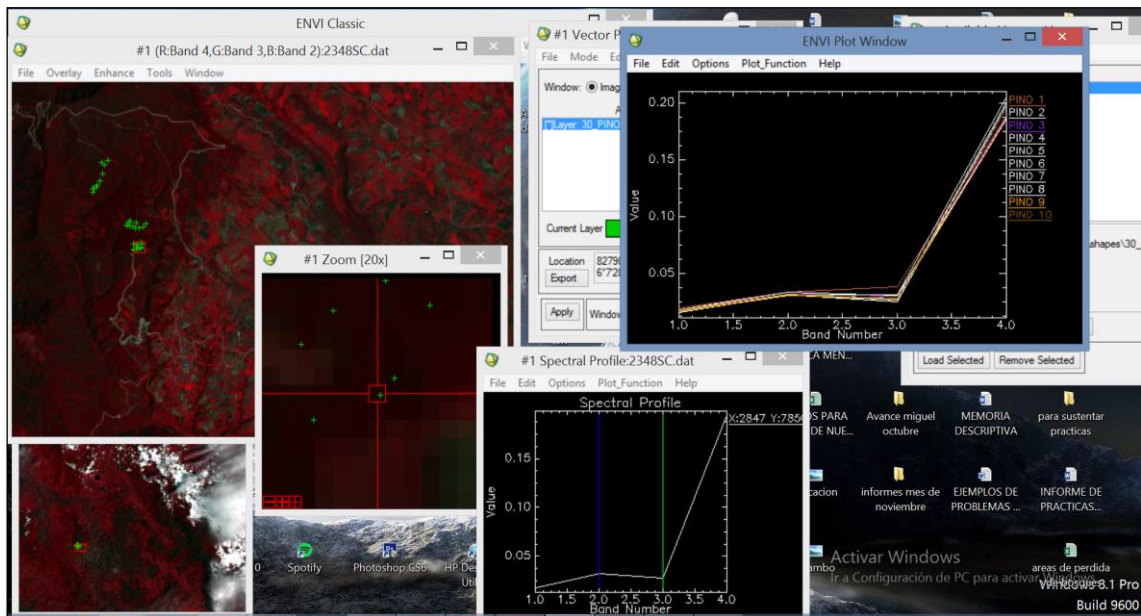
Anexo 3. Coordenadas de punto de muestreo (UTM 17S WG84) con sus respectivas firmas espectrales (Reflectancia %).

EDAD	N° PINO	ESTE X	NORTE Y	ALTITUD (m)	BANDA 2	BANDA 3	BANDA 4	BANDA 8	NDVI
20 AÑOS	Pino 1	828378	9321481	3070	0.0193	0.0333	0.0384	0.1892	0.662566
	Pino 2	828369	9321488	3071	0.0164	0.0307	0.0283	0.1877	0.737963
	Pino 3	828409	9321490	3067	0.0183	0.0322	0.0304	0.1882	0.721866
	Pino 4	828402	9321533	3069	0.0156	0.0313	0.0254	0.1983	0.77291
	Pino 5	828375	9321550	3064	0.0175	0.0311	0.031	0.2055	0.737844
	Pino 6	828420	9321552	3067	0.0176	0.0311	0.0265	0.2006	0.766623
	Pino 7	828450	9321569	3068	0.0179	0.0323	0.0307	0.1914	0.723548
	Pino 8	828475	9321555	3066	0.018	0.0311	0.0278	0.1953	0.750784
	Pino 9	828455	9321514	3064	0.0168	0.0308	0.0282	0.1855	0.736079
	Pino 10	828447	9321504	3062	0.0171	0.0317	0.0277	0.1948	0.751011
10 AÑOS	Pino 11	828403	9321794	3087	0.0172	0.0356	0.0279	0.2401	0.791791
	Pino 12	828333	9321812	3085	0.0158	0.0363	0.031	0.2141	0.747042
	Pino 13	828314	9321786	3083	0.0155	0.0306	0.0225	0.2057	0.802805
	Pino 14	828287	9321762	3077	0.02	0.0343	0.0295	0.2177	0.761327
	Pino 15	828327	9321753	3081	0.0171	0.0344	0.0288	0.2003	0.748581
	Pino 16	828359	9321753	3083	0.0164	0.0349	0.0274	0.2139	0.772897
	Pino 17	828391	9321734	3084	0.0159	0.0318	0.029	0.2229	0.76975
	Pino 18	828429	9321734	3084	0.0172	0.0362	0.0244	0.2311	0.809002
	Pino 19	828481	9321740	3077	0.0152	0.0319	0.0228	0.2384	0.825421
	Pino 20	828506	9321784	3081	0.015	0.0326	0.025	0.2285	0.802761
7 AÑOS	Pino 21	828078	9322492	3114	0.0187	0.0371	0.0291	0.2683	0.804304
	Pino 22	828008	9322467	3131	0.0211	0.0407	0.0397	0.2126	0.685295
	Pino 23	827911	9322169	3096	0.0163	0.0349	0.0265	0.2214	0.786204
	Pino 24	827907	9322128	3094	0.0197	0.0387	0.0317	0.232	0.759575
	Pino 25	827925	9322170	3105	0.0156	0.0354	0.026	0.2348	0.800614
	Pino 26	827949	9322189	3102	0.0178	0.0367	0.0286	0.2258	0.775157
	Pino 27	827958	9322214	3103	0.0162	0.037	0.028	0.2129	0.767538
	Pino 28	827995	9322260	3113	0.0184	0.0376	0.032	0.2255	0.751456
	Pino 29	828016	9322338	3120	0.0199	0.0377	0.0335	0.2295	0.745247
	Pino 30	828043	9322442	3132	0.0215	0.0395	0.0379	0.2227	0.709133

Anexo 4. Procesamiento de las bandas espectrales de la imagen satelital Sentinel-2



Corrección radiométrica y atmosférica de la imagen satelital, en el software QGIS versión 2.18.7



Análisis espectral de la imagen realizado en el software ENVI 5.3.

Anexo 5. Análisis de regresión de los datos espectrales y carbono aéreo en el programa Statistix 8.

REGRESIÓN LINEAL

• Unweighted Least Squares Linear Regression of CA

Predictor Variables	Coefficient	Std Error	T	P	VIF
Constant	1683.84	540.738	3.11	0.0047	
B2	1089.50	1715.48	0.64	0.5314	3.2
B3	-679.741	1174.46	-0.58	0.5681	4.4
B4	-15098.8	5415.57	-2.79	0.0102	182.7
B8	1530.79	637.975	2.40	0.0245	56.6
NDVI	-2004.18	709.526	-2.82	0.0094	249.4

R-Squared	0.6287	Resid. Mean Square (MSE)	79.0107
Adjusted R-Squared	0.5513	Standard Deviation	8.88879

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	5	3210.50	642.099	8.13	0.0001
Residual	24	1896.26	79.011		
Total	29	5106.75			

Cases Included 30 Missing Cases 0

REGRESIÓN B4 B8 NDVI

Unweighted Least Squares Linear Regression of CA

Predictor Variables	Coefficient	Std Error	T	P	VIF
Constant	1805.06	461.562	3.91	0.0006	
B4	-16113.0	4340.59	-3.71	0.0010	123.6
B8	1626.10	585.181	2.78	0.0100	50.1
NDVI	-2157.39	604.659	-3.57	0.0014	190.8

R-Squared	0.6181	Resid. Mean Square (MSE)	75.0017
Adjusted R-Squared	0.5741	Standard Deviation	8.66035

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	3	3156.71	1052.24	14.03	0.0000
Residual	26	1950.04	75.00		
Total	29	5106.75			

Cases Included 30 Missing Cases 0

$$CA = 1805.06 - 16113B4 + 1626.1B8 - 2157.39NDVI$$

Anexo 6. Panel fotográfico de las medidas y observaciones en campo del 12 al 21 de noviembre del 2017.



Fotografía 1. Sistema forestal de pinos (Pinus patula)



Fotografía 2. Plantaciones de pinos de 10 años.



Fotografía 3. Plantaciones de pino de 7 años



Fotografía 4. Identificación de pinos con poblador del distrito



Fotografía 5. Identificación de pinos con poblador del distrito



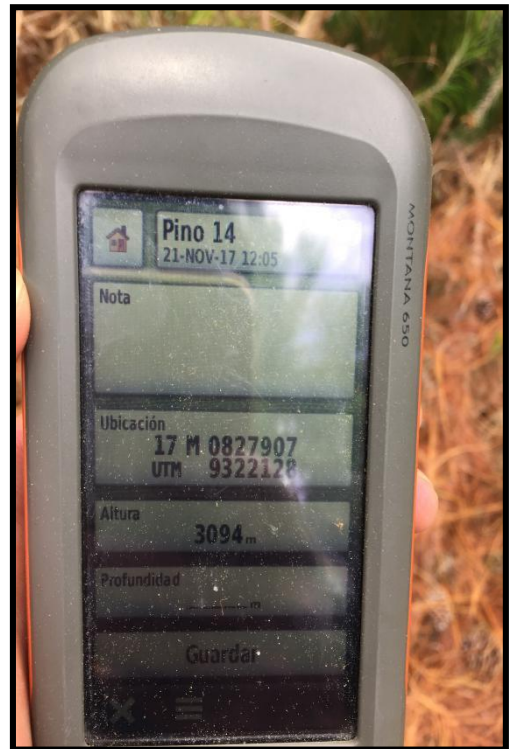
Fotografía 6. Medición del DAP.



Fotografía 7. Georreferenciación de los pinos



Fotografías 8 y 9. Medición de la altura con el distanciometro laser Leica



Fotografía 10 y 11. Toma de coordenadas UTM mediante el uso del GPS Garmin Montana 650.