

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



ESCUELA DE POSGRADO

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO
EN GESTIÓN PARA EL DESARROLLO SUSTENTABLE**

**ESTIMACIÓN DE CARBONO CON REDES
NEURONALES ARTIFICIALES EN PLANTACIONES DE
Pinus patula EN HUANCAS - CHACHAPOYAS**

Autora:

Bach. Katharine Rosabel Yajahuanca Gaytán

Asesor:

Dr. Segundo Manuel Oliva Cruz

Registro: (.....)

CHACHAPOYAS – PERÚ

2023

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN DE LA TESIS EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL DE LA UNTRM



UNTRM

Reglamento del Proceso de Graduación en la
Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional
Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas

ANEXO 6

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN DE LA TESIS EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL DE LA UNTRM

1. Datos de autor 1

Apellidos y nombres (tener en cuenta las tildes):

YAJAHUANCA GAYTAN KATHARINE ROSABEL

DNI N°: 73435657

Correo electrónico: Katharine.Yajahuanca.epg@untrm.edu.pe

Nombre de la Maestría /Doctorado ():

GESTIÓN PARA EL DESARROLLO SUSTENTABLE

Datos de autor 2

Apellidos y nombres (tener en cuenta las tildes):

DNI N°: _____

Correo electrónico: _____

Nombre de la Maestría ()/Doctorado (): _____

2. Título de la tesis para obtener el grado académico de Maestro / Doctor ()

ESTIMACIÓN DE CARBONO CON REDES NEURONALES

ARTIFICIALES EN PLANTACIONES DE Pinus patula EN HUANCAS - CHACHAPOYAS

3. Datos de Asesor

Apellidos y nombres: OLIVA CRUZ SEGUNDO MANUEL

DNI, Pasaporte, C.E N°: 05374749

ORCID: 0000-0002-9670-0970

Datos de Co-Asesor

Apellidos y nombres: _____

DNI, Pasaporte, C.E N°: _____

ORCID: _____

4. Campo del conocimiento según Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos-OCDE CIENCIAS AGRICOLAS.

5. Originalidad del Trabajo

Con la presentación de esta ficha, el autor o autores señalan expresamente que la obra es original, ya que sus contenidos son producto de su directa contribución intelectual. Se reconoce también que todos los datos y las referencias a materiales ya publicados están debidamente identificados con su respectivo crédito e incluidos en las notas bibliográficas y en las citas que se destacan como tal.

6. Autorización de publicación

El o los titular de los derechos de autor otorga a la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas (UNTRM), la autorización para la publicación del documento indicado





en el punto 2, bajo la *Licencia creative commons* de tipo BY-NC: Licencia que permite distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir de su obra de forma no comercial por lo que la Universidad deberá publicar la obra poniéndola en acceso libre en el repositorio institucional de la UNTRM y a su vez en el Registro Nacional de Trabajos de Investigación-RENATI, dejando constancia que el archivo digital que se está entregando, contiene la versión final del documento sustentado y aprobado por el Jurado Evaluador.

Chachapoyas, 10 de NOVIEMBRE de 2023

AUTOR 1

AUTOR 2

ASESOR

CO-ASESOR



DEDICATORIA

A Dios por ayudarme a levantarme en cada dificultad de mi vida y darme fortaleza en mi desarrollo personal y profesional.

A mis padres y hermanos por brindarme ejemplos dignos de superación y entrega, porque creyeron en mí y gracias a ustedes logré alcanzar mi meta anhelada.

AGRADECIMIENTO

A Dios por guiarme en este camino lleno de experiencias.

A mi familia por ayudarme moralmente a terminar mi tesis.

A la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, porque me dio la oportunidad de culminar con la Maestría en Gestión para el desarrollo sustentable.

A mi Asesor, el Dr. Segundo Manuel Oliva Cruz por su visión crítica, conocimientos, experiencia y su motivación para lograr concluir el proyecto.

A mis amigos, compañeros y a todas las personas que han compartido sus conocimientos y tiempo para que mi proyecto se termine con éxito.

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

Ph.D. JORGE LUIS MAICELO QUINTANA
Rector

Dr. OSCAR ANDRÉS GAMARRA TORRES
Vicerrector Académico

Dra. MARÍA NELLY LUJÁN ESPINOZA
Vicerrectora de Investigación

Dr. EFRAIN MANUELITO CASTRO ALAYO
Director de la Escuela de Posgrado

JURADO EVALUADOR DE LA TESIS



Dr. Carlos Eduardo Millones Chanamé

PRESIDENTE



Dra. Elena Victoria Torres Mamani

SECRETARIO



MSc. Armstrong Barnard Fernandez Jeri

VOCAL

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE LA TESIS



UNTRM

Reglamento del Proceso de Graduación en la
Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional
Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas

ANEXO 3

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD

Los suscritos, miembros del Jurado Evaluador del Proyecto de Tesis ()/Tesis Tesis en Formato de Artículo Científico () titulado:

Estimación de Carbono Con redes neuronales artificiales en Plantaciones de Pinus patula en Huancas - Chachapoyas.

presentado por el Aspirante Katharine Rosabel Yajahuanca Gaytán para obtener el Grado Académico de Maestro /Doctor () en Gestión para el Desarrollo Sustentable

de la Escuela de Posgrado de la UNTRM, hacemos constar que después de revisar la originalidad del Proyecto de Tesis ()/Tesis /Tesis en formato de artículo científico () con el software de prevención de plagio **Turnitin**, verificamos:

a) De acuerdo con el informe de originalidad (adjunto), el Proyecto de Tesis ()/Tesis /Tesis en formato de artículo científico () tiene 22 % de similitud, que es menor al 25% permitido en la UNTRM.

b) La persona responsable de someter el trabajo al software de prevención de plagio

Turnitin fue:

Dr. Segundo Manuel Oliva Cruz.

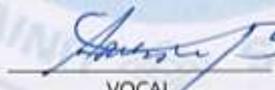
y pertenece al área () / oficina () / dependencia de Facultad de ingeniería y Ciencias Agrarias.

Chachapoyas, 02 de agosto del 2022




SECRETARIO


PRESIDENTE


VOCAL

OBSERVACIONES:

.....
.....

ACTA DE SUSTENTACION DE LA TESIS



UNTRM

Reglamento del Proceso de Graduación en la
Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional
Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas

ANEXO 5

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En el lugar Auditorio de la EPG de la ciudad de Chachapoyas, el día 16 de Setiembre del año 2022, siendo las 16:00 horas, el Aspirante Katharine Rosabel Yajahuanca Gaytán, defiende en sesión pública presencial la Tesis titulada: Estimación de Carbono con redes neuronales artificiales en plantaciones de Pinus Patula en Huancas - Chachapoyas para obtener el Grado Académico de Maestro /Doctor () en Gestión para el Desarrollo Sustentable a ser otorgado por la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas; ante el Jurado Evaluador, conformado por:

Presidente: Dr. Carlos Eduardo Millones Chaname
Secretario: Dra. Elena Victoria Torres Mamani
Vocal: Msc. Armstrong Barnard Fernandez Jeri

Procedió el aspirante a hacer la exposición de la Introducción, Material y método, Resultados, Discusión y Conclusiones, haciendo especial mención de sus aportaciones originales. Terminada la defensa de la Tesis, los miembros del Jurado Evaluador pasaron a exponer su opinión sobre la misma, formulando cuantas cuestiones y objeciones consideraron oportunas, las cuales fueron contestadas por el aspirante.

Tras la intervención de los miembros del Jurado Evaluador y las oportunas respuestas del aspirante, el Presidente abre un turno de intervenciones para los presentes en el acto de sustentación, para que formulen las cuestiones u objeciones que consideren pertinentes.

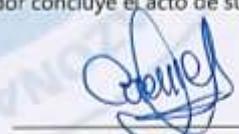
Seguidamente, a puerta cerrada, el Jurado Evaluador determinó la calificación global concedida a la sustentación de la Tesis, en términos de:

Aprobada /Desaprobada () por Unanimidad /Mayoría ().

Otorgada la calificación, el Secretario del Jurado Evaluador lee la presente Acta en esta misma sesión pública. A continuación se levanta la sesión.

Siendo las 13:30 horas del mismo día y fecha, el Jurado Evaluador concluye el acto de sustentación de la Tesis.


SECRETARIO


PRESIDENTE


VOCAL

OBSERVACIONES:

En la sustentación los miembros de jurado tuvieron observaciones al informe de tesis, las cuales fueron levantadas el 12 de junio de 2023.

ÍNDICE

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN DE LA TESIS EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL DE LA UNTRM	ii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
JURADO EVALUADOR DE LA TESIS	vii
CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE LA TESIS	viii
ACTA DE SUSTENTACION DE LA TESIS	ix
ÍNDICE	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xv
I. INTRODUCCIÓN	16
II. MATERIAL Y MÉTODOS	20
2.1. Metodología	20
2.1.1. Ubicación del área de estudio	20
2.1.2. Diseño metodológico	21
2.1.3. Estimación de la captura de carbono en plantaciones de <i>P. patula</i> Schltdl. & Cham. a través de ecuación alométrica.	22
2.1.4. Estimación de la captura de carbono de <i>P. patula</i> Schltdl. & Cham. con redes neuronales artificiales.	23
2.1.5. Analizar la sostenibilidad económica de la plantación <i>P. patula</i> Schltdl. & Cham. del sector Huanca Urco mediante los indicadores económicos.	26
III. RESULTADOS	29
3.1. Estimación de la captura de carbono en plantaciones de <i>P. patula</i> Schltdl. & cham. a través de ecuación alométrica.	29

3.2. Estimación de la captura de carbono de P. patula Schltld. & cham. con redes neuronales artificiales	30
3.2.1. Índices de vegetación y altitud	30
3.2.2. Reflectancia	31
3.2.3. Análisis de Correlación de variables	31
3.2.4. Configuración redes neuronales artificiales	33
3.2.5. Estimación de carbono con redes neuronales artificiales	34
3.3. Análisis de la sostenibilidad económica de la plantación P. patula Schltld. & cham. del sector Huanca Urco mediante los indicadores económicos.	37
3.3.1. Determinación de dióxido de carbono (CO₂) capturado	37
3.3.2. Valoración de CO₂	38
3.3.3. Ingresos económicos por fijación de CO₂	38
3.3.4. Egresos económicos por fijación de CO₂	39
3.3.5. Flujo de caja con proyección a 5 años	42
IV. DISCUSIÓN	45
V. CONCLUSIONES	48
VI. RECOMENDACIONES	49
VII.REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50
ANEXOS	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Área de estudio.....	20
Figura 2. Índices de vegetación. a) NDVI, b) SAVI, c) GNDVI, d) Altitud, e) Correlación, f) Valores.....	30
Figura 3. Reflectancia. (a) Banda 2; (b) Banda (3); (c) Banda 4; (d) Banda 5; (e) correlación de las Variables y el carbono observado; (f) valores de reflectancia.....	31
Figura 4. Análisis de correlación de variables.....	32
Figura 5. RNA de variables espaciales; (a) RNA con NDVI; (b) RNA con GNDVI; (c) RNA con SAVI.....	33
Figura 6. RNA con variables Altura total. (a) RNA con Altura total (HT) y NDVI; (a) RNA con Altura total (HT) y GNDVI; (a) RNA con Altura total (HT) y SAVI.....	33
Figura 7. RNA con Diámetro a la altura del pecho (DAP). (a) RNA con DAP, GNDVI y SAVI; (b) RNA con DAP, NDVI y SAVI; (c) RNA con DAP y SAVI.....	34
Figura 8. Correlación entre el Carbono Observado y Carbono Estimado. (a) RNA con GNDVI; (b) RNA con NDVI; (c) RNA con SAVI; (d) RNA con Altura total y GNDVI; (e) RNA con Altura total y NDVI; (f) RNA con Altura total y SAVI;(g) RNA con DAP y GNDVI; (h) RNA con DAP y NDVI; (i) RNA con DAP y SAVI.....	36
Figura 9. Precio de tonelada de CO ₂ en los últimos 10 años.....	38

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Índices de vegetación.....	25
Tabla 2. Biomasa y Carbono de <i>P. patula</i> Schldl. & cham.....	29
Tabla 3. Parámetros estadísticos de la estimación de carbono con RNA.....	35
Tabla 4. Determinación de dióxido de carbono (CO ₂)	37
Tabla 5. Ingresos por fijación de CO ₂ en la plantación Huanca Urco	39
Tabla 6. Costos de inversión.....	40
Tabla 7. Costos de manejo de plantación	40
Tabla 8. Gastos administrativos.....	41
Tabla 9. Costos fijos	41
Tabla 10. Costo de herramientas e instrumentos	42
Tabla 11. Flujo de caja.....	43

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue estimar la captura de carbono con redes neuronales artificiales en plantaciones de *Pinus patula* Schltdl. & Cham. en Huancas, Chachapoyas, Perú. La metodología fue de tipo descriptivo, correlacional y de corte transversal, que consistió en la estimación de captura de carbono empleando la ecuación alométrica, para lo cual primero se estimó la biomasa empleando la siguiente ecuación $B = 0.6575 * DAP^{1.1794}$ y posteriormente calcular el carbono mediante $Ca = Ba * 0.5$, logrando estimar que en promedio cada árbol de la plantación estudiada captura 27 kg/C, posteriormente para la estimación de carbono mediante redes neuronales artificiales (RNA) se procedió a la construcción de redes mediante el algoritmo backpropagation en donde se combinaron variables dasométricas e índices espectrales a fin de encontrar la red que mejor estime el carbono, resultando que la RNA construida con DAP y NDVI estima de mejor manera el carbono ya que obtiene $R = 0.99$ y un $RQEM = 3.47$; finalmente se realizó el análisis de sostenibilidad con proyección a 5 años para la venta de bonos de CO₂ llegando a obtener un $TIR = 387 \%$. Se concluye que las estimaciones de carbono con redes neuronales artificiales son mejores cuando se combinan variables espectrales y dasométricas; así mismo, la venta de bonos de CO₂ es rentable y sostenible pues se obtienen altas ganancias económicas.

Palabras clave: Machine learning, Teledetección, Modelamiento matemático, sensores remotos, manejo forestal.

ABSTRACT

The objective of this research was to estimate carbon sequestration with artificial neural networks in *Pinus patula* Schlttdl plantations. & cham. in Huancas - Chachapoyas. The descriptive, correlational and cross-sectional methodology, which consisted of estimating carbon sequestration using the allometric equation, for which the biomass was first estimated using the following equation $B = 0.6575 * DAP^{1.1794}$ and later calculating the carbon using $Ca = Ba * 0.5$, managing to estimate that on average each tree of the studied plantation captures 27 kg / Ca, later for the estimation of carbon through artificial neural networks (ANN), we proceeded to the construction of networks using the backpropagation algorithm where Dasometric variables and spectral indices were combined in order to find the network that best estimates carbon, resulting in that the RNA constructed with DAP and NDVI estimates carbon in a better way since it obtains $R = 0.99$ and an $RQEM = 3.47$; Finally, the sustainability analysis was carried out with a 5-year projection for the sale of CO₂ bonds, reaching an $IRR = 387\%$. It is concluded that carbon estimates with artificial neural networks are better when spectral and dasometric variables are combined; Likewise, the sale of CO₂ bonds is profitable and sustainable since high economic profits are obtained.

Keywords: Machine learning, Remote sensing, Mathematical modeling, remote sensing, forest management.

I. INTRODUCCIÓN

En todo el mundo existe una preocupación por el calentamiento de la tierra, por el acrecentamiento de la cantidad de gases de efecto invernadero (Wilson y Abel, 2007). Actualmente, el mundo y en el Perú enfrentamos un problema ambiental muy severo como el cambio climático, por aumento en la generación antropogénica de gases de efecto invernadero (GEI) como el dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno y metano, que provienen de diferentes actividades como el uso de combustibles fósiles para la generación de energía y transporte, los efectos del cambio de uso del suelo, degradación de áreas boscosas, los incendios forestales y las grandes industrias como las que se dedican a la elaboración de cemento, entre otros (Echeverría et al., 2018; Vega, 2018). En la actualidad, en el continente americano se observan diversos esfuerzos por instrumentar políticas públicas referidas a la mitigación y a la adaptación al cambio climático (Sánchez y Reyes, 2015).

De manera general, la huella del carbono está compuesta por la cantidad de gases de efecto invernadero liberados en la atmósfera generados por la producción de bienes o servicios (Minx, et al., 2009; Pandey, et al., 2010; Espíndola & Valderrama, 2011).

Por su parte, las plantaciones forestales producen diversos servicios, ya que mantienen la biodiversidad, fijan carbono (C), regulan el clima, brindan áreas para la recreación, presentan belleza paisajística, retención hídrica, evitan la erosión del suelo, son una fuente de oxígeno, reciclan nutrientes y otros; además, generan beneficios directos del aprovechamiento de sus recursos como: obtención de madera, leña, semillas, materia orgánica, látex, fibra, producción de hongos, etc. (Inoñan, 2014).

Se estima que, en las áreas boscosas se puede llegar a capturar 137 toneladas de CO₂ por hectárea, en los bosques de la selva amazónica se pueden llegar a capturar hasta aproximadamente 305 toneladas de CO₂ por hectárea (Parra, 2016).

Casanova et al. (2011) menciona que a través de la fotosíntesis se llega a almacenar el carbono en ecosistemas naturales, así como en las plantaciones forestales. Por otra parte, también menciona que en una plantación es posible estudiar las reservas de

carbono de ésta, tan solo con una muestra de árboles, a partir de esta muestra es posible generar modelos matemáticos para predecir el contenido de carbono teniendo un mínimo de variables (Casanova et al., 2011).

Actualmente la generación de reservas de carbono mediante los bosques o sistemas agroforestales se ha transformado en un servicio ambiental a nivel global y que puede significar un valor económico notable para países en vías de desarrollo (Martínez y Fernández, 2004).

En ese sentido, los ecosistemas forestales representan un gran aporte para el planeta brindando servicios ecosistémicos, sin embargo, aún las estimaciones del secuestro de carbono en plantaciones son muy inciertas, sabiendo que contribuye en la mitigación del cambio climático (Sever et al., 2019). Se han realizado acuerdos internacionales como el protocolo de Kioto, el acuerdo de París, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMCC) con la finalidad de mitigar el cambio climático (Vega, 2018). El Estado Peruano ha decidido incentivar la inversión privada para el establecimiento de plantaciones forestales tanto en tierras públicas como en tierras de propiedad privada a través del DS N° 020-2015-MINAGRI, Reglamento para la Gestión de Plantaciones Forestales y Sistemas Agroforestales.

Se han desarrollado distintas metodologías convencionales para medir la captura de carbono, la mayoría de estos métodos son difíciles de realizar, sus costos son elevados y su disposición para aplicar a cualquier lugar es limitada (Simegn et al., 2014); ante esto, surge la posibilidad de estimar el carbono haciendo uso de la teledetección, pues se muestra como una importante alternativa para mitigar estas limitaciones, el uso de la teledetección para este tipo de estudios está sustentada ampliamente por reportes a diversas escalas y ambientes especiales (Vicharnakorn et al., 2014; Raciti et al., 2014; Maselli et al., 2017), ya que actualmente las imágenes provenientes de sensores remotos son usadas de manera general en diferentes líneas de investigación, luego de que estas imágenes sean transformadas a información notable, así mismo, el uso de estas imágenes es factible pues su adquisición es simple y muchas de ellas están disponibles para todas las personas (Chuvieco, 2016).

Debido al gran interés de conocer los beneficios ambientales que genera la captura de CO₂ en una plantación forestal, diversos autores han realizado investigaciones sobre el tema en mención de los cuales resaltan León y Rodríguez (2017) quienes en su estudio estimaron el valor económico del sumidero de carbono, para esto realizaron una exploración de las investigaciones realizadas sobre la cantidad de carbono en los páramos del Ecuador. A partir de la cantidad de carbono almacenado, estimaron los beneficios de los Certificados de Emisiones de Carbono (CEC) y obtuvieron que los beneficios monetarios por disminuir las emisiones de CO₂ son aproximadamente 10,7 millones US\$ a un precio de 0.14 US\$/TCO₂ hasta un valor de 359 millones US\$ a un precio de 4,67 US\$/TCO₂. La creación y existencia de áreas naturales protegidas traen consigo beneficios económicos muy altos, esto se ve reflejado al analizar uno de sus servicios ambientales como es la captura y almacenamiento de carbono como en los suelos del Páramo de la REAA los beneficios obtenidos son alrededor de \$ 11 millones de dólares como valor mínimo. Además de Ramírez et al. (2012) quienes determinaron la proporción de carbono que un plantío en dicha región puede almacenar y capturar. Para esto los autores analizaron un total de 479 individuos divididos en quince bloques, midieron el diámetro y la altura de los árboles para determinar la cantidad de carbono almacenado en la biomasa aérea. Como resultado obtuvieron un total de 2 126,90 kg/C, en una superficie de 2 945 m², con un mínimo de 0,0576 kg/C, un máximo de 13,252 kg/C y una media de 4,440 kg/C. Los análisis estadísticos realizados indican que existen diferencias significativas entre árboles. Concluyendo que en una hectárea se pueden capturar 7,22 ton/ha.

En los últimos años se ha venido implementando el uso de las redes neuronales artificiales para estimar la captura de carbono, estas redes están constituidas por un procesador computacional paralelamente distribuido, que está comprendido por unidades de procesamiento simples semejantes a la estructura biológica calificada para replicar las características básicas del cerebro humano como la auto adaptabilidad, autoorganización y la tolerancia a errores (Flores et al., 2008; Haykin, 2001), además de tener una gran capacidad para resolver problemas de aproximación, predicción, clasificación, y optimización (Braga et al., 2007); por ende, las redes neuronales artificiales (RNA) constituyen una herramienta de apoyo a la modelización que tienen la habilidad para determinar interrelaciones complejas a partir de la información (Moreno et al., 2014).

Conociendo la importancia del tema y a partir de lo anteriormente descrito, en la presente investigación se planteó el siguiente problema: ¿Es posible estimar la captura de carbono en plantaciones de *Pinus patula* Schltdl & Cham en Huancas - Chachapoyas aplicando redes neuronales artificiales?, por lo tanto, con la finalidad de atender a la problemática suscitada se planteó el objetivo de estimar la captura de carbono con redes neuronales artificiales en plantaciones de *P. patula* Schltdl. & cham. en Huancas – Chachapoyas, para esto se contemplaron los objetivos específicos: Estimar la captura de carbono en plantaciones de *P. patula* Schltdl. & cham. a través de ecuación alométrica, estimar la captura de carbono de *P. patula* Schltdl. & Cham. a través de redes neuronales artificiales y analizar la sostenibilidad económica de la plantación *P. patula* Schltdl. & Cham. del sector Huanca Urco mediante los indicadores económicos.

II. MATERIAL Y MÉTODOS

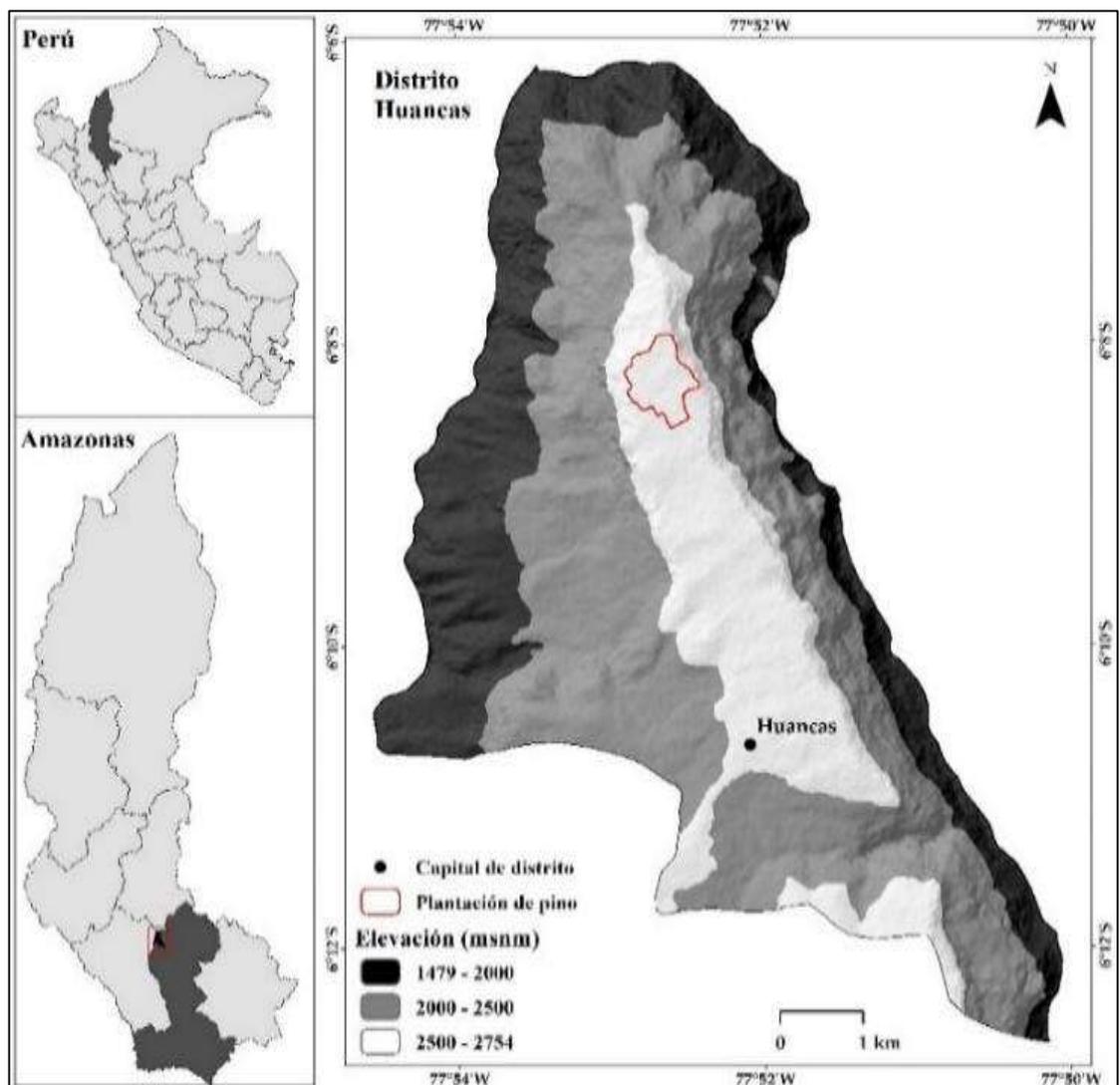
2.1. Metodología

2.1.1. Ubicación del área de estudio

La investigación se realizó en las plantaciones de *P. patula* Schlttdl. & cham. ubicados en el sector de Huanca Urco, perteneciente al distrito de Huancas, provincia de Chachapoyas, departamento de Amazonas con una extensión de 52,8 ha., con una altitud promedio 2718,3 msnm. (Gobierno Regional de Amazonas, 2019)

Figura 1.

Área de estudio



- **Limites**

Por el norte limita con la provincia de Bongará; hacia el este con el distrito de Sonche; por la parte sur con el distrito de Chachapoyas y; por la parte oeste con la provincia de Luya (Gobierno Regional de Amazonas, 2019).

- **Característica socioeconómica**

Huancas se encuentra ubicado a 15 km de la ciudad de Chachapoyas, esta cercanía hace que los turistas la visiten, en dicho distrito se encuentra la comunidad campesina Huancas, la cual mantiene su cultura viva a través del tiempo lo cual hace que la visita a este lugar sea más atractiva e interesante lo cual la diferencia de otros destinos; a esto, se le suma que este lugar tiene con paisajes únicos y apacibles, integradas con muchos lugares turísticos interesantes que han sido relacionados por la DIRCETUR Amazonas, a partir de la cual se sabe que existen 26 recursos turísticos que están distribuidos en las distintas categorías: 13 en la categoría de manifestaciones culturales, 6 en la categoría folklore, 5 en la categoría sitios naturales, 1 en la categoría acontecimientos programados y en la categoría realizaciones técnicas, científicas y artísticas contemporáneas (Mazuelos, 2021).

- **Fecha de instalación de plantación**

La plantación de *P. patula* Schltldl. & Cham. fue instalada en el mes de enero del año 2008, mediante un financiamiento del Fondo Italo Peruano (FIP) siendo la Unidad Ejecutora el Gobierno Regional Amazonas y con la participación de la Comunidad Campesina de Huancas. (Gobierno Regional de Amazonas, 2019).

2.1.2. Diseño metodológico

La presente investigación es de tipo descriptivo, correlacional y de corte transversal, no se manipularon variables, y los datos de presencia de las especies fueron recolectados en un único momento en el tiempo. La estimación de carbono se realizó a partir de datos dasométricos provenientes de inventarios forestales e índices de vegetación obtenidos a partir de técnicas de teledetección, con los cuales se construyeron redes neuronales artificiales en el lenguaje de programación R en su IDE Rstudio aplicando el algoritmo Backpropagation.

La población contemplada en esta investigación fue una plantación de 52.8 hectáreas de *P. patula* Schltdl. & Cham (Gobierno Regional de Amazonas, 2019). La unidad de muestreo fue determinada según lo propuesto por Phillip et al. (2018) y Herrera (2009) quien indica que cada unidad deben ser parcelas fijas de 20 metros de largo por 20 metros de ancho haciendo un área de 400 m². Por lo tanto, en 52.8 hectáreas se tiene 1320 unidades de muestreo que corresponde a la población total incluida en la investigación.

La muestra seleccionada en esta investigación fue calculada según la fórmula de tamaño de muestra para población finita que se expresa algebraicamente de la siguiente manera:

$$n = \frac{Z^2 * P * Q * N}{E^2(N - 1) + Z^2 * P * Q}$$

Donde: n= tamaño de muestra; Z = grado de confiabilidad (85 %); P= probabilidad; Q = No probabilidad; E = error muestral (15 %); N = tamaño de la población (1320).

Según la fórmula anterior se determinó que el número muestra corresponde a 23 unidades de muestreo de 400 m².

La selección de las unidades de muestreo fue mediante selección no probabilística por conveniencia ya que todas tienen las mismas características y por ende la misma probabilidad de ser seleccionadas para el estudio

2.1.3. Estimación de la captura de carbono en plantaciones de *P. patula* Schltdl. & Cham. a través de ecuación alométrica.

Para la estimación de la captura de carbono de las plantaciones de *P. patula* Schltdl. & Cham., se siguió los siguientes pasos:

a. Recolección de datos dasométricos

En cada unidad de muestreo se encontraron entre 70 y 146 árboles, por lo cual se realizó un inventario forestal al 100 % de cada parcela (23 parcelas); donde se recopiló información dasométrica de todos los individuos de DAP (diámetro a la altura del pecho) mayor a 30 cm; la información consistió en la medición de la altura total (HT) empleando un Hipsómetro Suunto y la medición de la circunferencia a la

altura del pecho (CAP) haciendo uso de una cinta métrica (Anexo 1), a partir de la medición del CAP se procedió a calcular el DAP (Quiceno et al., 2016).

$$DAP = CAP / \pi$$

b. Cálculo de la biomasa

Para estimar la biomasa se utilizó la ecuación alométrica propuesta por Oliva et al. (2017).

$$BA = 2.5361 * DAP * 1.1794, \text{ con } r^2 = 0.91$$

Luego para determinar la concentración de la biomasa aérea para cada parcela, se realizó la sumatoria de las biomásas individuales de cada uno los árboles en kg/par (Kilogramo/parcela), posteriormente se realizará una conversión métrica para obtener los resultados en t/ha (tonelada/ha).

c. Cálculo del Carbono de *P. patula* Schltl. & Cham.

El cálculo de carbono se realizó multiplicando la biomasa determinada por un factor de 0.5 ya que (Brown,1997) menciona que el 50 % de la biomasa del árbol es carbono (Brown, 1997; Echeverría et al., 2018; Gonzalez et al., 2020); por lo tanto, la expresión matemática para este cálculo es la siguiente:

$$CA = BA * 0.5$$

2.1.4. Estimación de la captura de carbono de *P. patula* Schltl. & Cham. con redes neuronales artificiales.

La estimación de la captura de carbono de las plantaciones de *P. patula* Schltl. & Cham. con redes neuronales artificiales se realizó en el lenguaje de programación R en su IDE Rstudio v 4.1.1.

Por lo tanto, se realizó el siguiente procedimiento para poder dar cumplimiento al segundo objetivo:

a. Criterio de selección de imagen satelital

Las imágenes satelitales para descargar solo presentaron el 10 % de nubosidad.

b. Obtención de imagen satelital y DEM

Las imágenes fueron obtenidas a través del portal USGS (Science for a changing world), considerando la fecha de muestreo julio 2021.

c. Procesamiento de datos de teledetección.

Se utilizaron las imágenes multiespectrales del sensor OLI del satélite Landsat 8 para realizar el estudio, a las cuales en primer lugar se les aplicó la corrección atmosférica aplicando la metodología DOS1 o Substracción de Objeto Oscuro (Congedo, 2018). Posteriormente, se generará una imagen multiespectral en el software QGIS 3.18.3 mediante la combinación de Bandas 2, 3, 4 y 5.

d. Determinación de los índices de vegetación

Teniendo la imagen corregida, se calcularon los índices de vegetación (VI), los que fueron obtenidos a partir de los valores corregidos de los píxeles de la imagen. Por lo tanto, los índices de vegetación que se utilizaron en esta investigación fueron los siguientes: Índice de Diferencia Normalizada de Vegetación (NDVI) que tiene como objetivo de separar la vegetación del brillo que produce el suelo; este índice diferencia la vegetación de otro tipo de coberturas y se obtiene a través de la relación de la banda del infrarrojo cercano (NIR) y banda del rojo (Red), su escala de medición va de 1 hasta -1; (Silleos et al., 2006; Díaz, 2015), el Índice de Diferencia Normalizada de Vegetación Verde (GNDVI) que determina el verdor de la planta o actividad fotosintética, el GNDVI es uno de los índices de vegetación más utilizados para determinar la captación de agua y nitrógeno en el dosel del cultivo (Diaz, 2015) y el Índice de Vegetación Ajustada al Suelo (SAVI) tiene como finalidad medir el vigor y estructura del dosel de la vegetación; además, tiene un ajuste para la cubierta del suelo ya que este índice incorpora una constante de suelo, este índice permite minimizar los efectos que tiene el suelo agregando una variable L, donde para vegetación muy densa toma el valor de uno (1), para vegetación medio densa toma el valor de 0.5 y para escasa vegetación toma un valor de 0.25 todo depende del terreno (Rodríguez & Bullock, 2013; Díaz, 2015), asimismo, la expresión algebraica de cada uno de estos índices se presenta a continuación:

Tabla 1.

Índices de vegetación.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad SAVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED + L} * (1 + L)$$
$$GNDVI = \frac{NIR - GREEN}{NIR + GREEN}$$

e. Análisis de Correlación de Variables

Teniendo las variables a ser entrenadas en las redes neuronales se procedió a realizar una correlación de Pearson a fin de poder validar y analizar estadísticamente el comportamiento y relación entre ellas. El coeficiente se define por expresión, cuando $\rho = +$ la relación es correcta entre las variables. Si $\rho = -$ la relación es inversa y si $\rho = 0$ serán independientes (Dagnino, 1980).

$$\rho = \frac{cov(x, y)}{\sigma_x \sigma_y}$$

f. Entrenamiento de redes neuronales artificiales

Para la construcción de las redes neuronales artificiales se utilizó el 50% de los datos para el entrenamiento y el 50% para la validación, las variables de entrada fueron biomasa, DAP, Altura total, el valor de reflectancia de las bandas 2, 3, 4, 5, los índices de vegetación, además de la edad y la altitud; la variable de salida se consideró el carbono estimado con la información dasométrica obtenida del inventario forestal; con el algoritmo backpropagation.

g. Análisis estadístico

Una vez obtenidos los valores en toneladas de carbono, el análisis estadístico se realizó mediante la utilización del lenguaje de programación R en su IDE Rstudio v. 4.1.1. Por lo tanto, las estimaciones obtenidas por las redes neuronales artificiales se evaluaron mediante la correlación (R) entre el carbono estimado y el carbono observado ($R\hat{Y}Y$), además se evaluó el sesgo (BIAS), también la raíz cuadrada del

error cuadrático medio (RQEM) y la diferencia media absoluta (MDA). Los resultados fueron analizados mediante la gráfica de residuos, correlación y frecuencia.

2.1.5. Analizar la sostenibilidad económica de la plantación *P. patula* Schltdl. & Cham. del sector Huanca Urco mediante los indicadores económicos.

Para analizar la sostenibilidad económica de la plantación *P. patula* Schltdl. & Cham. del sector Huanca Urco, se realizó el siguiente procedimiento:

a. Determinación del dióxido de carbono (CO₂) capturado.

El CO₂ capturado, se determinó mediante la relación (44/12) que representa el peso molecular del CO₂ (Concha et al., 2007). Por tanto, de la siguiente forma se obtendrá un aproximado de la capacidad de almacenamiento de CO₂ en toneladas.

$$CO_2 = Kr * C$$

Donde:

CO₂: Dióxido de carbono (tnCO₂).

Kr: $\frac{44}{12}$ (Una unidad de carbono elemental es 3,67 unidades de CO₂).

C: Carbono acumulado.

b. Determinación del costo por tonelada capturada de CO₂

En la valoración económica del servicio ecosistémico de la plantación *P. patula* Schltdl. & cham. del sector Huanca Urco mediante los indicadores económicos se realizó con la siguiente formula:

$$VE = tnCO_2 * P$$

Donde:

tnCO₂: Toneladas de dióxido de carbono equivalente.

P: Precio de toneladas de dióxido de carbono equivalente.

Se considerará el precio actualizado al mes de julio 2021 (fecha de ejecución del proyecto), según el Sistema Europeo de Negociaciones de CO₂ en el portal <https://www.sendeco2.com>.

c. Análisis de sostenibilidad económica de la plantación *P. patula* Schltdl. & Cham. del sector Huanca Urco mediante los indicadores económicos.

Mediante los indicadores económicos financieros, se analizó la sostenibilidad económica de la plantación *P. patula* Schltdl. & Cham. del sector Huanca Urco, realizando cálculos que requieren los indicadores económicos planteados como se indican. (Barrezueta-Unda et al., 2019; Molano & Díaz, 2001).

● **Valor Actualizado Neto (VAN)**

Se calculó con la siguiente ecuación:

$$VAN = \sum \frac{B_t - C_t}{(1 + r)^t}$$

Donde:

B= Beneficio en el año t

C= Costos en el año t

r= tasa de descuento aplicada

● **Tasa interna de retorno (TIR)**

Se calculó con la siguiente ecuación:

$$TIR = \sum \frac{B_t - C_t}{(1 + p)^t}$$

Donde:

B= Beneficios alcanzados en el año t

C= Costos incurridos en el año t

r= tasa interna de retorno aplicada

● **Beneficio / costo (B/C)**

Se calculó con la siguiente ecuación:

$$B/C = \frac{Tbe}{Tcd}$$

Donde:

B/C= Relación beneficio costo.

Tbe= Total beneficios encontrados.

Tcd= Total costos encontrados.

III. RESULTADOS

3.1. Estimación de la captura de carbono en plantaciones de *P. patula* Schltl. & cham. a través de ecuación alométrica.

En la Tabla 2, se presenta el resultado de la biomasa y carbono calculados en cada una de las parcelas de evaluación a partir de ecuaciones alométricas (ítem 2.3.2), los resultados indican que la parcela con mayor cantidad de árboles es la de código PA-18 con 143 árboles, la parcela que obtuvo la mayor cantidad de biomasa y de carbono fue la de código PA-10 con 31.50 kg de biomasa y 15.55 kg de carbono, por otra parte la parcela con menor cantidad de biomasa y carbono fue la parcela PA-14 con 23.10 kg de biomasa y 11.55 kg de carbono capturado.

Tabla 2.

Biomasa y Carbono de P. patula Schltl. & cham

Parcela	Nº de árboles	Biomasa (kg)	Carbono (kg)	Carbono (tn)
PA-01	80	27.82	13.91	0.014
PA-02	112	29.94	14.97	0.015
PA-03	120	26.20	13.10	0.013
PA-04	95	26.70	13.34	0.013
PA-05	95	27.01	13.51	0.014
PA-06	72	27.80	13.89	0.014
PA-07	92	28.80	14.40	0.014
PA-08	96	28.98	14.49	0.014
PA-09	101	25.38	12.69	0.013
PA-10	106	31.10	15.55	0.016
PA-11	97	27.83	13.91	0.014
PA-12	99	26.48	13.24	0.013
PA-13	107	30.15	15.07	0.015
PA-14	82	23.10	11.55	0.012
PA-15	126	24.42	12.21	0.012
PA-16	102	27.03	13.52	0.014
PA-17	121	27.40	13.70	0.014
PA-18	143	26.43	13.21	0.013
PA-19	128	27.49	13.74	0.014
PA-20	101	28.54	14.27	0.014
PA-21	87	26.26	13.13	0.013
PA-22	126	28.44	14.22	0.014
PA-23	103	26.62	13.31	0.013
Promedio			13.69	0.014

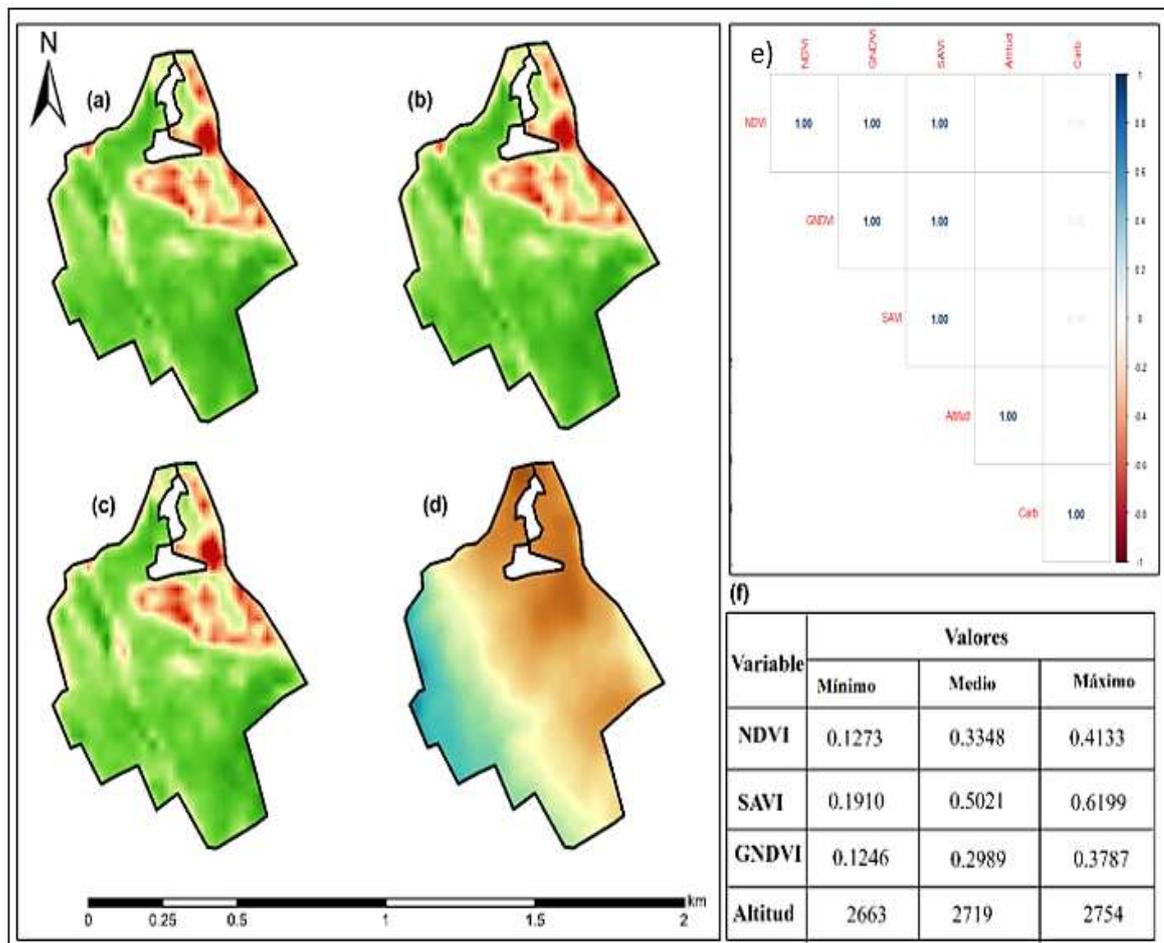
3.2. Estimación de la captura de carbono de *P. patula* Schltdl. & cham. con redes neuronales artificiales

3.2.1. Índices de vegetación y altitud

En la Figura 2, son presentadas las variables empleadas en el modelamiento generadas a partir de los índices de vegetación y la altitud del área de estudio, los resultados indican que el valor del NDVI varía de 0.1273 a 0.4133, del SAVI varía de 0.1910 a 0.6199, del GNDVI varía de 0.1246 a 0.3787 y la altitud del área de estudio varía de 2663 a 2754 msnm, además se puede apreciar que existe una alta correlación entre cada uno de los índices esto se demuestra en la Fig. 2. donde se aprecia valores de 1 entre cada uno de los índices.

Figura 2.

Índices de vegetación. a) NDVI, b) SAVI, c) GNDVI, d) Altitud, e) Correlación, f) Valores.

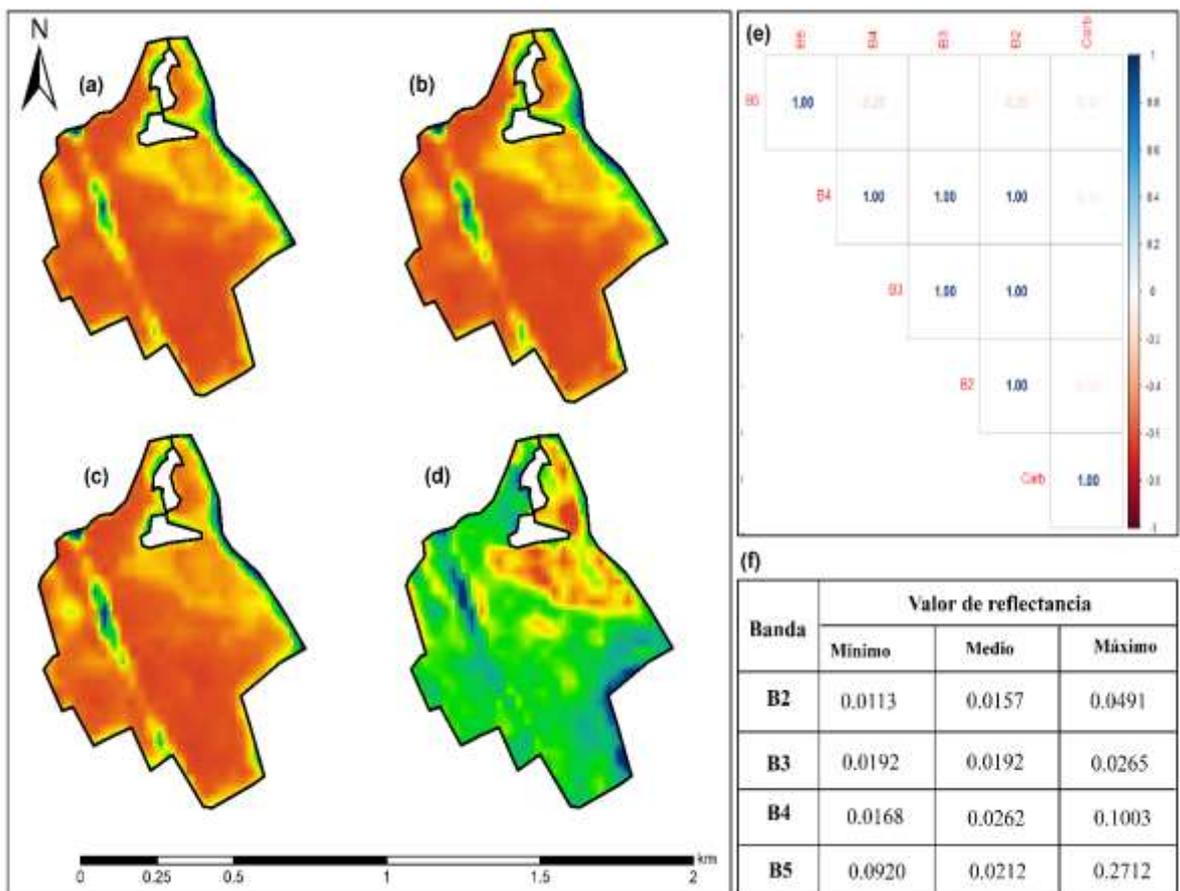


3.2.2. Reflectancia

En la Figura 3, son presentados los valores de reflectancia de las bandas 2, 3, 4 y 5 de la imagen del satélite Landsat 8, los cuales indican el porcentaje de incidencia de radiación, es así que se puede apreciar que la banda que tiene la mayor incidencia de radiación es la B5 con 0.2712 y la que tiene el menor incidencia de radiación es la banda B2 con 0.0113; por otra parte, se observa que existe una baja correlación entre la reflectancia de las bandas analizadas y el carbono estimado (0.10 y -0.10).

Figura 3.

Reflectancia. (a) Banda 2; (b) Banda (3); (c) Banda 4; (d) Banda 5; (e) correlación de las Variables y el carbono observado; (f) valores de reflectancia.



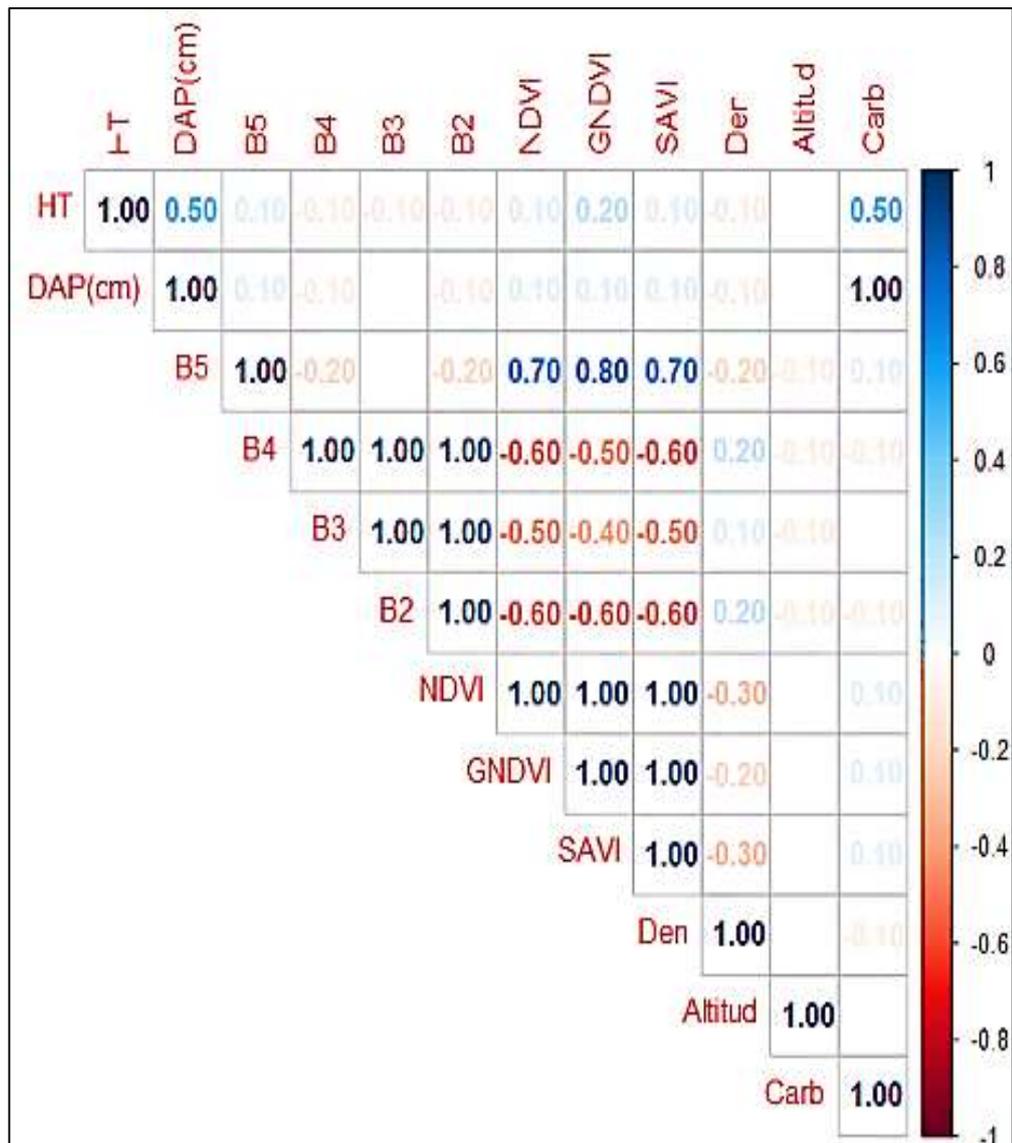
3.2.3. Análisis de Correlación de variables

En la Figura 4, se presentan los resultados del análisis de correlación de las variables seleccionadas para el modelamiento, donde se puede observar que las variables que

tienen la correlación más alta con el carbono son la Altura total (HT) y el diámetro a la altura del pecho (DAP) con 0.5 y 1.0 respectivamente, por otra parte, se puede apreciar que las demás variables empleadas en el estudio tienen una baja correlación con el carbono.

Figura 4.

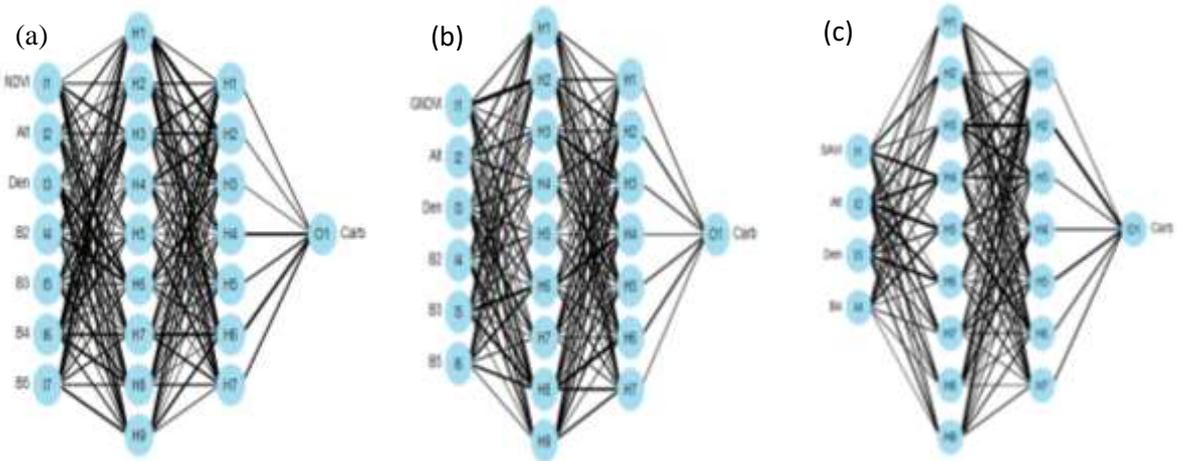
Análisis de correlación de variables



3.2.4. Configuración redes neuronales artificiales

Figura 5.

RNA de variables espaciales; (a) RNA con NDVI; (b) RNA con GNDVI; (c) RNA con SAVI



En la Figura 5, son presentadas la estructura de las Redes Neuronales Artificiales construidas para la estimación del carbono, estas redes estuvieron constituidas tan solo por variables espaciales como lo son la reflectancia, índices y altitud sobre el nivel del mar, se aprecia que existe una mejor interacción cuando se tiene mayor cantidad de variables.

Figura 6.

RNA con variables Altura total. (a) RNA con Altura total (HT) y NDVI; (a) RNA con Altura total (HT) y GNDVI; (a) RNA con Altura total (HT) y SAVI.

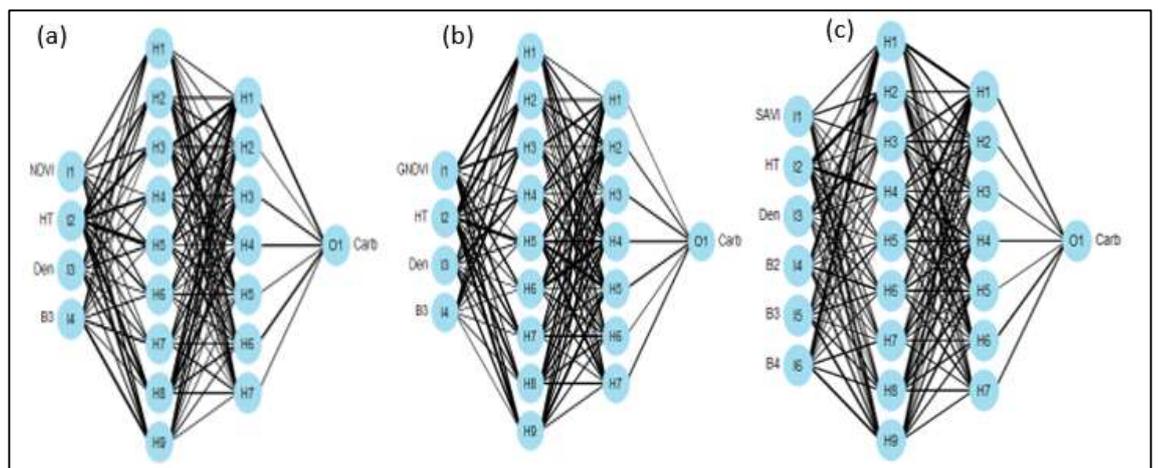
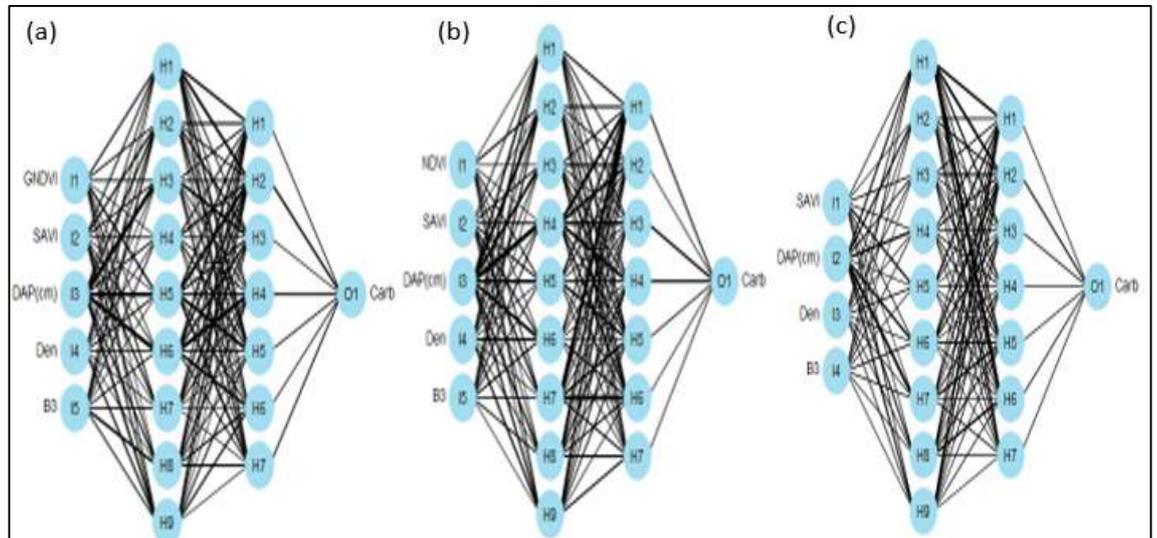


Figura 7.

RNA con Diámetro a la altura del pecho (DAP). (a) RNA con DAP, GNDVI y SAVI; (b) RNA con DAP, NDVI y SAVI; (c) RNA con DAP y SAVI.



En la Figura 6 y 7 se presentan las redes neuronales artificiales que tuvieron como variables de entrada, las variables espaciales y dasométricas, para el entrenamiento se ingresó con las variables dasométricas DAP y HT independientemente adicionando variables espaciales a fin de obtener los mejores resultados estadísticos.

3.2.5. Estimación de carbono con redes neuronales artificiales

En la Tabla 3 se presentan los resultados de los parámetros estadísticos evaluados para la estimación del carbono con cada red neuronal artificial desarrollada en esta investigación, donde se puede evidenciar que al desarrollar una RNA tan solo con variables espaciales (índices de vegetación y altitud) el coeficiente de correlación es bajo, siendo así que la RNA que presentó mejor desempeño es la que tiene al GNDVI como variable espacial principal ya que el R es igual 0.20; por otro lado cuando se entrena la RNA con Altura total y un índice espectral el que presenta mejor resultado estadístico es el NDVI con $R = 0.53$; cuando se entrena la RNA con el DAP y un índice espectral se encuentra alto valor de correlación entre los valores estimados observados para la RNA con los 3 índices.

Tabla 3.

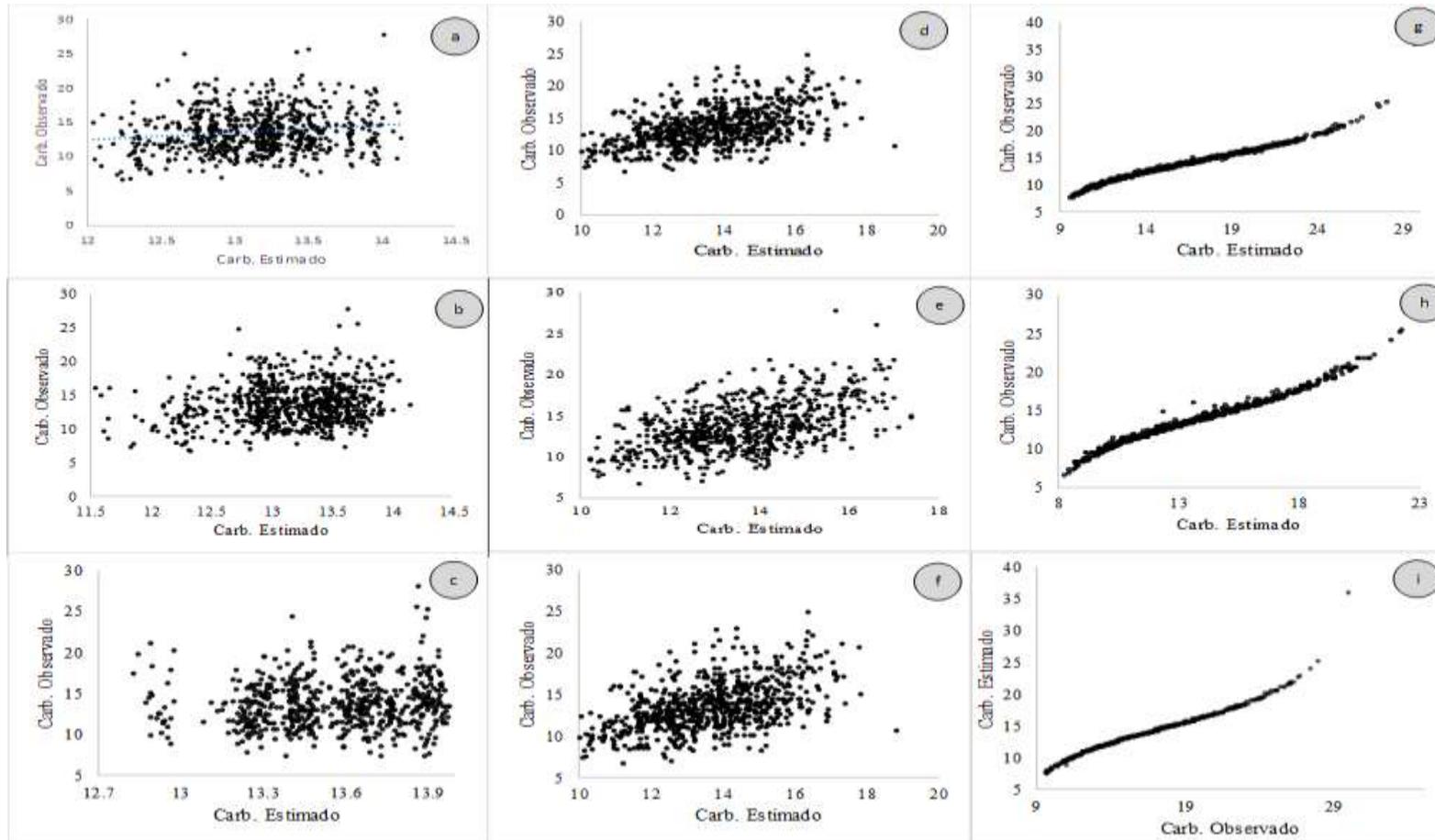
Parámetros estadísticos de la estimación de carbono con RNA

Variables	R	MDA	RQEM	BIAS
NDVI	0.15	2.34	22.00	- 0.52
GNDVI	0.20	2.32	21.83	- 0.50
SAVI	0.14	2.31	21.61	- 0.20
Altura total ~ GNDVI	0.49	1.94	18.42	0.07
Altura total ~ NDVI	0.53	1.95	18.16	-0.04
Altura total ~ SAVI	0.49	1.94	18.42	0.07
DAP ~ GNDVI	0.98	2.62	20.82	2.60
DAP ~ NDVI	0.99	0.30	3.47	- 0.09
DAP ~ SAVI	0.98	2.60	20.46	2.59

En la Figura 8 se presenta la gráfica de la correlación entre el carbono estimado con cada una de las redes neuronales artificiales construidas y el carbono calculado con la ecuación alométrica, en el gráfico se observa que cuando la correlación es mayor, los puntos de valor están menos dispersos y más cercanos a la línea de tendencia y cuando la relación es menor los valores están más dispersos y distantes a la línea de tendencia.

Figura 8.

Correlación entre el Carbono Observado y Carbono Estimado. (a) RNA con GNDVI; (b) RNA con NDVI; (c) RNA con SAVI; (d) RNA con Altura total y GNDVI; (e) RNA con Altura total y NDVI; (f) RNA con Altura total y SAVI; (g) RNA con DAP y GNDVI; (h) RNA con DAP y NDVI; (i) RNA con DAP y SAVI.



3.3. Análisis de la sostenibilidad económica de la plantación *P. patula* Schltdl. & cham. del sector Huanca Urco mediante los indicadores económicos.

3.3.1. Determinación de dióxido de carbono (CO₂) capturado

Para la determinación del dióxido de carbono (CO₂) capturado, se realizó con la relación (44/12) que representa el peso molecular del CO₂ con lo cual expresa la capacidad de almacenamiento de CO₂ en toneladas.

En la Tabla 4, se presenta la determinación de dióxido de carbono de las parcelas evaluadas en la plantación de *P. patula* Schltdl. & cham. del sector Huanca Urco, donde se puede observar que en total las 23 parcelas evaluadas obtienen un total de 1154.70 tn de CO₂ y en promedio 50.21 tn de CO₂.

Tabla 4.

Determinación de dióxido de carbono (CO₂)

Parcela	N° de árboles	Biomasa (kg)	Carbono (kg)	CO ₂ (kg)	CO ₂ (tn)
PA-01	80	27.82	13.9080	51.00	0.051
PA-02	112	29.94	14.9694	54.89	0.055
PA-03	120	26.19	13.0968	48.02	0.048
PA-04	95	26.69	13.3428	48.92	0.049
PA-05	95	27.01	13.5053	49.52	0.050
PA-06	72	27.78	13.8915	50.94	0.051
PA-07	92	28.79	14.3971	52.79	0.053
PA-08	96	28.98	14.4893	53.13	0.053
PA-09	101	25.37	12.6869	46.52	0.047
PA-10	106	31.10	15.5490	57.01	0.057
PA-11	97	27.83	13.9135	51.02	0.051
PA-12	99	26.48	13.2381	48.54	0.049
PA-13	107	30.15	15.0746	55.27	0.055
PA-14	82	23.10	11.5506	42.35	0.042
PA-15	126	24.42	12.2105	44.77	0.045
PA-16	102	27.03	13.5152	49.56	0.050
PA-17	121	27.39	13.6970	50.22	0.050
PA-18	143	26.43	13.2134	48.45	0.048
PA-19	128	27.48	13.7418	50.39	0.050
PA-20	101	28.54	14.2714	52.33	0.052
PA-21	87	26.26	13.1296	48.14	0.048
PA-22	126	28.44	14.2220	52.15	0.052
PA-23	103	26.62	13.3102	48.80	0.049

Promedio	103	27.38	13.69	50.21	0.050
Total	2391	629.85	314.92	1154.70	1.155

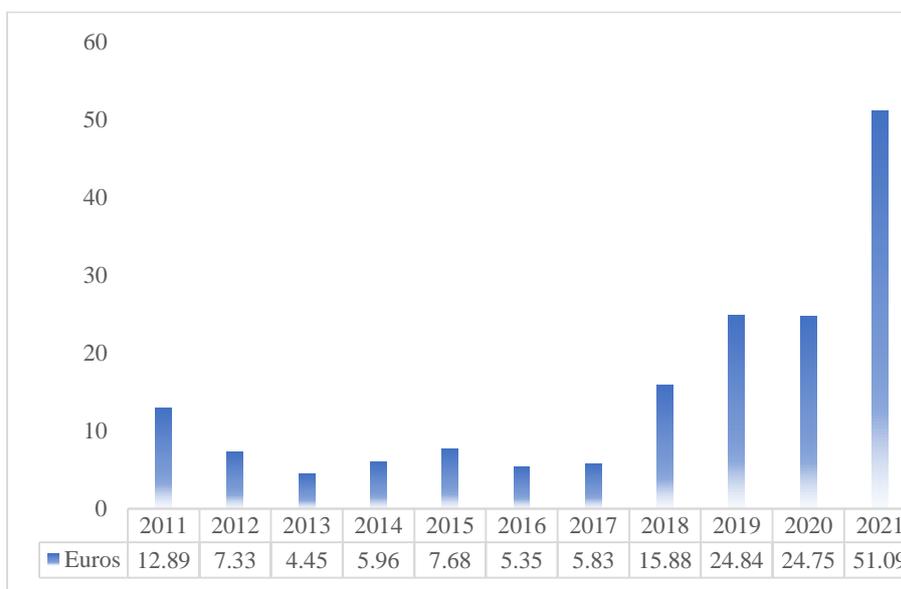
3.3.2. Valoración de CO₂

Para la valoración de CO₂ se tomó el precio del CO₂ por tonelada para el año 2021, para esto se visitó el sitio web del Sistema Europeo de Negociación de CO₂ (SENDECO₂).

En la Figura 9, se presenta el promedio anual del precio de cada tonelada de CO₂ durante los últimos 10 años, donde se puede apreciar que para el año 2021 el precio por cada tonelada de CO₂ es de 51.09 euros.

Figura 9.

Precio de tonelada de CO₂ en los últimos 10 años.



3.3.3. Ingresos económicos por fijación de CO₂

Los ingresos de la plantación Huanca Urco, se dan a partir de los datos obtenidos de la valoración económica de la captura de carbono de *P. patula* Schltdl. & cham, para esto se eligió la entidad de mercado SENDECO₂, la elegibilidad de esta entidad se dio debido a que lleva muchos años en el cuidado del ambiente, además que proporciona un sistema en la negociación de derechos de emisión de forma segura, eficiente y transparente; además, que ha sido usado en diversos proyectos internacionales de reducción de dióxido de carbono.

Tabla 5.

Ingresos por fijación de CO₂ en la plantación Huanca Urco

Empresa	CO₂ capturado	Precio (euros)	Total (euros)
SENDECO2	65260.00	56.64	3,696,326.4

En la Tabla 5, se presenta los ingresos por fijación de CO₂ según el valor de fijación propuesto por Sencor2 donde se puede apreciar que para el área total de la plantación el ingreso asciende a USS. 3 696 326.4.

3.3.4. Egresos económicos por fijación de CO₂

Los egresos económicos generados por la plantación Huanca Urco, se dan a partir de las necesidades que tiene la comunidad campesina encargada de la plantación, para el cumplimiento de requerimientos, planes o programas establecidos para el resguardo y mejoramiento de la plantación, además para el cálculo se tomó en cuenta las actividades que están relacionadas con la conservación de la especie *P. patula* Schltdl. & cham.

Costos de inversión

Los costos de inversión por la plantación de *P. patula* Schltdl. & cham en el distrito de Huancas son los que en la actualidad determinarían el costo de la instalación de una plantación forestal y vienen a ser el costo del terreno el cual se consideró de S/ 20 000.00 por hectárea, además del costo de la unidad de plantón de la especie estudiada que es de S/ 0.50 por cada plantón y que se requiere un total de 1111 plantones por cada hectárea, a esto se le suma el costo de transporte de plantón que es de S/ 0.25 por plantón y el costo de la instalación de los plantones que viene a ser de S/ 800.00 por hectárea ; en base a esto, teniendo en cuenta que el área de estudio abarca un total de 52 hectáreas la inversión estimados para el total son presentados en la tabla 5.

Tabla 6.

Costos de inversión

Descripción	Unidad	Costo unitario	Costo total
Terreno	Hectárea	20000.00	1040000.00
Costo de plantón	Plantón	0.50	28886.00
Costo de transporte de plantón	Plantón	0.25	7221.50
Instalación de plantón	Hectárea	800.00	41600.00
Total			1 117 707.50

Costos de Manejo de plantaciones

Los costos de manejo para una plantación forestal están determinados según lo que se requiere para su desarrollo y correcta producción, estos costos se considera una inflación anual del 1.5 % y son presentados en la Tabla 6.

Tabla 7.

Costos de manejo de plantación

Actividad	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Mantenimiento (podas, raleo, replante)	359307.36	413203.464	475183.98	546461.58	628430.8183
Limpieza de terreno	62760.00	72174.00	83000.10	95450.115	109767.6323
Apertura de caminos	10000.00	0	0	0	0
Análisis de suelo	234000.00	0	234000		
Fertilización inicial	35080.00	0	0	0	0
Fertilización posterior		25344.00	29145.60	33517.44	38545.056
Control de plagas	10040.00	11546.00	13277.90	15269.585	17560.02275
Delimitación del área	8500.00	0	0	0	0
Inventario de árboles	13000.00	14950	17192.5	19771.375	22737.08125
Instalación de cortafuegos	62400.00	0	0	0	0
Total	795,087.36	537,217.46	851,800.08	10,470.10	817,040.61

Gastos administrativos

Para el óptimo desarrollo de la plantación forestal, se debe contar con personal humano administrativo, para esto, en esta investigación se ha contemplado requerir los servicios de un profesional administrador, un técnico forestal y un capataz, estos gastos están sujetos a una inflación anual del 1.5 %, en la Tabla 7 se presentan los resultados de la estimación de gastos para cada personal requerido, en estos gastos se contempla todos los pagos por derecho a ley.

Tabla 8.

Gastos administrativos

Personal	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Técnico forestal	66,202.50	67,195.54	68,203.47	69,226.52	70,264.92
Administrador	51,490.83	52,263.19	53,047.14	53,842.85	54,650.49
Contador	51,490.83	52,263.19	53,047.14	53,842.85	54,650.49
Capataz	36,779.17	37,330.86	37,890.82	38,459.18	39,036.07
Total	205,963.33	209052.78	212188.572	215371.4002	218601.9712

Costos fijos

Los costos fijos considerados para este proyecto son los que conllevan gastos de instalación y de funcionamiento de oficina, estos gastos están sujetos a una inflación anual del 1.5 %.

Tabla 9.

Costos fijos

Concepto	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Alquiler de oficina	18000.00	18270.00	18544.05	18822.2108	19104.5439
Agua	1440.00	1461.60	1483.524	1505.77686	1528.36351
Luz	1800.00	1827.00	1854.405	1882.22108	1910.45439
Teléfono	1440.00	1461.60	1483.524	1505.77686	1528.36351
Internet	2160.00	2192.40	2225.286	2258.66529	2292.54527
Subtotal	24840.00	25212.60	25590.789	25974.6508	26364.2706
Otros (10%)	2484.00	2521.260	2559.0789	2597.46508	2636.42706
Total	52164.00	52946.46	53740.6569	54546.7668	55364.9683

Costos de herramientas e instrumentos

Las herramientas e instrumentos que se requieren para el manejo y producción de la plantación son las que se detallan en la Tabla 10, las cuales están sujetas a una inflación del 1.5 % anual.

Tabla 10.

Costo de herramientas e instrumentos

	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Herramientas					
Machetes	300.00	172.50	119.03	91.25	104.94
Picos	500.00	230.00	132.25	76.04	-
Palanas	650.00	224.25	171.93	197.71	113.69
Tijera de podar	450.00	207.00	119.03	136.88	-
Wincha	550.00	316.25	72.74	-	96.20
Carretilla	2,500.00	-	-	760.44	-
Protector de oídos	180.00	86.25	59.51	22.81	-
Casco	420.00	161.00	92.58	53.23	61.22
Guantes de cuero	420.00	80.50	92.58	53.23	-
Mascarilla	180.00	17.25	19.84	-	-
Maquinaria					
Chaleadora	15,000.00	2,875.00	3,306.25	7,604.38	8,745.03
Ahoyador	6,240.00	1,794.00	-	-	2,728.45
Mochila fumigadora	10,240.00	2,944.00	3,385.60	-	4,477.46
Motosierra	10,400.00	2,990.00	-	3,954.28	-
Moto lineal	54,000.00	-	-	27,375.75	31,482.11
Podadora telescópica	4,000.00	-	-	-	-
Subtotal	102,030.00	12,098.00	7,571.31	12,950.25	16,326.97
Imprevistos (10 %)	10,203.00	1,209.80	757.13	1,295.03	1,632.70
Total	112,233.00	13,307.80	8,328.44	14,245.28	17,959.67

3.3.5. Flujo de caja con proyección a 5 años

En base a lo analizado en los ingresos y egresos estimados en puntos anteriores, se calculan los flujos de caja de cada periodo. Luego, empleando un costo de oportunidad del accionista (KOA) de 20% se obtiene un valor actual neto (VAN) de 13 010 005.22 soles y una tasa interna de retorno económico (TIRE) de 387 %. Por lo tanto, dadas las condiciones del proyecto, es rentable económicamente, los resultados de dicho análisis se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11.

Flujo de caja

PRESUPUESTO DE CAJA PROYECTADO A 5 AÑOS						
CONCEPTO	Año 0	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
Inversión	1,213,547.50					
Total, de inversión	1,213,547.50					
INGRESOS						
VENTAS (Tn/co2)		65273	65273	65273	65273	65273
TOTAL, INGRESOS		7,049,484.00	7,049,484.00	7,049,484.00	7,049,484.00	7,049,484.00
EGRESOS						
Costo de manejo		795,087.36	537,217.46	851,800.08	710,470.10	817,040.61
Compras		178,601.16	181,280.18	183,999.38	186,759.37	189,560.76
Gastos administrativos		205,963.33	209,052.78	212,188.57	215,371.40	218,601.97
Costos fijos		52,164.00	52,946.46	53,740.66	54,546.77	55,364.97
Asesorías y capacitaciones		12000	12120	12241.2	12363.612	12487.24812
Herramientas y maquinarias		112,233.00	13,307.80	8,328.44	14,245.28	17,959.67
TOTAL, EGRESOS		1,356,048.85	1,005,924.68	1,322,298.34	1,193,756.52	1,311,015.23
UTILIDAD ANTES DE IMPUESTOS		5,693,435.15	6,043,559.32	5,727,185.66	5,855,727.48	5,738,468.77
IMPUESTOS (10%)		1,057,422.60	1,057,422.60	1,057,422.60	1,057,422.60	1,057,422.60
Utilidad bruta después de impuestos	- 1,213,547.50	4,636,012.55	4,986,136.72	4,669,763.06	4,798,304.88	4,681,046.17
VAN	13,010,005.22					
TIR	387%					

A partir de los resultados obtenidos en esta investigación, es posible concebir que 23 parcelas de plantación de *Pinus patula* Schtml ex cham, puede capturar hasta 65260 tn de CO₂ lo cual se traduce en 3 696 326.4 de euros, este monto significa un buen ingreso económico con lo cual incide de manera directa en el aspecto social, pues con esto es posible que se mejore la calidad de vida de los comuneros de la Comunidad Campesina Huancas, ya que se generará puestos de trabajo; además, desde el punto de vista ambiental esta plantación forestal, logrará ofrecer diversos beneficios ecosistémicos, como la restauración de los suelos degradados, retención de agua, creación de microclimas y además servirá como albergue para diversas comunidades de fauna silvestre.

IV. DISCUSIÓN

En este estudio se estimó la captura de carbono en una plantación de *P. patula* a través de la ecuación alométrica de biomasa propuesta por Oliva et al. (2017) obteniéndose que en promedio en el área evaluada un árbol captura 27.38 kg/C, lo cual es similar a los resultados obtenidos por Oliva et al., (2017) quien en los resultados obtenidos de su investigación realizada en el distrito de Molinopampa en la provincia de Chachapoyas indica que los árboles de *P. patula* en promedio capturan un total de 30.99 kg de carbono, de la misma forma estos hallazgos son reforzados por los de otros autores como Norverto (2006) quien indica que las especies que pertenecen al género pinus capturan un aproximado de 25,23 t CO₂/ha/año; según estos resultados obtenidos en la presente investigación se puede determinar que la metodología empleada para la estimación de carbono por medio de ecuaciones alométricas es precisa y es válida para la estimación en áreas similares a la evaluada en este trabajo.

En cuanto al análisis de correlación entre el carbono estimado y las variables dasométricas y espectrales las que presentan mejor correlación son las variables dasométricas (Figura 4) pues, según el coeficiente de correlación de *Pearson* el DAP correlacionado al carbono presenta un $r = 1$, seguido de la correlación con la altura total con $r = 0.50$, y las variables espectrales como índices de vegetación presentan una baja correlación con el carbono estimado, estos resultados obtenidos son similares a los obtenidos por Ibáñez (2013) quien en su estudio indica que según los resultados obtenidos mediante correlación de los datos de índices de vegetación con los de contenido de carbono muestran un nivel de asociación entre estas variables muy bajo.

Para la estimación de la captura de carbono de *P. patula* con redes neuronales artificiales se procedió a construir redes neuronales artificiales las cuales fueron construidas con datos dasométricos como el DAP y la altura total y variables como espectrales provenientes de sensores remotos (Figura 6 y 7), la incorporación de datos espectrales para estos estudios se debe a la fiabilidad que presentan para estudios de estimación de carbono, esto es comprobado por diversos estudios como el de Sánchez, (2016) quien indica que la utilización de imágenes satelitales nos permiten realizar estimaciones de variables ecológicas con un alto grado de precisión para el monitoreo de grandes

extensiones de ecosistemas, de la misma forma; a partir de esto, es que se procedió a estimar la captura de carbono con redes neuronales artificiales integrando datos espectrales y dasométricos obteniendo buenos resultados lo cual se puede ver reflejado mediante los parámetros estadísticos evaluados (Tabla 3) donde se puede observar que los mejores resultados se obtuvieron cuando se integró el DAP con el índice de vegetación NDVI pues el coeficiente de correlación obtenido fue $r = 0.99$ con lo cual se puede determinar que la estimación de carbono con redes neuronales artificiales integrando datos espectrales y dasométricos es confiable, esto es respaldado por estudios como el de Gasparri et al., (2007) quien en su investigación menciona que las imágenes satelitales proveen datos valiosos que pueden ser relacionados con información de campo para desarrollar metodologías de monitoreo de biomasa aérea y por ende carbono; por otra parte, Echeverría et al., (2018) y Pérez (2016) mencionan que la estimación de carbono con índices espectrales como el NDVI presenta valores aceptables y confiables, de la misma manera Eichhorn et al., (2018) indica que el uso de los índices espectrales obtenidos a partir de imágenes satelitales son un buen insumo para conocer la biomasa de las coberturas vegetales, siempre y cuando se realicen procedimientos adecuados (procesamiento digital de imágenes).

Por otra parte, las redes neuronales artificiales que presentaron mejores resultados de estimación fueron las que combinaron variables dasométricas y espectrales ya que se obtuvo valores de coeficiente de correlación aceptables superiores (0.5, 0.98 y 0.99), esto es reforzado por los resultados obtenidos por Moreno et al., (2014) quien indica que cuando se construyen redes neuronales artificiales donde se combinan variables los resultados son mejores.

Con los resultados obtenidos en esta investigación se puede determinar que la estimación de carbono mediante técnicas indirectas como las ecuaciones alométricas ofrecen resultados de alta precisión, lo cual se corrobora al constatar los resultados obtenidos en otras investigaciones como las de Díaz et al. (2007) y Parky et al. (2017) quienes en sus investigaciones obtuvieron resultados positivos y con alto grado de correlación.

Dentro del análisis económico se consideraron acciones de manejo de plantaciones como las podas y aclareos ya que si se aplica un plan de manejo a la plantación de *P.patula* se puede llegar a tener mayores cantidades de secuestro de carbono y por ende de CO₂, pues como menciona Chávez-Aguilar et al., (2016) las acciones de manejo forestal como los aclareos hacen que se estimule el incremento en diámetro del fuste y por su parte Villar et al., (2004) indican que cuando se realizan acciones como la poda se está estimulando al incremento del árbol.

V. CONCLUSIONES

A través de la ecuación alométrica se estimó que los árboles de las plantaciones de *P. patula* Schltdl. & cham de Huancas - Chachapoyas capturan en promedio 27 kg de carbono lo que hace un total de 98.99 kg de CO₂ por árbol.

La configuración de la red neuronal artificial que combinó las variables espectrales y dasométricas es la que estimó mejor el carbono de las plantaciones de *P. patula* Schltdl. & cham de Huancas - Chachapoyas, pues el coeficiente de correlación (R) fue superior a 0.9.

Luego de realizar la estimación de carbono mediante redes neuronales artificiales se concluye en la configuración de la RNA debe de contener por lo menos una variable medida en campo (dasométrica) DAP o Altura total, pues de esta forma es que se obtienen mejores resultados.

La estimación carbono empleando las técnicas de teledetección y redes neuronales artificiales se presenta como una posibilidad de disminuir costos en dicho proceso, considerando además que a la actualidad se siguen desarrollando métodos convencionales destructivos que llegan a ser costosos y generar un impacto negativo en los ecosistemas donde se interviene.

Se realizó el análisis de la sostenibilidad económica de la plantación *P. patula* Schltdl. & cham. del sector Huanca Urco mediante los indicadores económicos, con lo cual se puede determinar que en el área de estudio la posibilidad de vender bonos de CO₂ es rentable y viable por la naturaleza del ecosistema y los ingresos que generaría.

VI. RECOMENDACIONES

En trabajos futuros, los investigadores deben emplear otras técnicas de estimación de carbono en la plantación de *P. patula* Schltdl. & Cham de Huancas - Chachapoyas a fin de que se presente un abanico de posibilidades y se genere una variedad de metodologías para dicho proceso.

Se recomienda que se realicen estudios de captura de carbono en suelo, pues como es sabido el carbono aparte de encontrarse en el estrato arbóreo es posible también encontrarlo en el estrato edáfico.

A futuros investigadores se les recomienda que estimen la captura de carbono con imágenes de sensores radar pues cabe la posibilidad que se obtengan estimaciones más precisas y cercanas a la realidad debido a la alta resolución de estas imágenes.

A la comunidad campesina Huancas se exhorta que se instalen cortafuegos en la plantación, pues al no existir estos, en un incendio forestal se corre el riesgo de una rápida propagación del fuego por la cantidad de material combustible que se encuentra en la zona lo cual generaría daños irreversibles al ecosistema.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barbosa, E. P., Moreno, F., y Alvarez-Dávila, E. (2017). *Contenido de carbono en un bosque de tierra firme del resguardo Nonuya-Villazul, amazonia colombiana*. *Colombia forestal*, 20(2), 144-157.
- Barrezueta-Unda, S., Ríos-Carrión, P., Quezada-Abad, C., & Moreira-Blacio, W. (2019). Cuantificación del valor económico del CO₂ en una plantación de theobroma cacao L. *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas.*, 2(2631–2662), 134–140.
- Brown, S. (1997). Los bosques y el cambio climático: el papel de los terrenos forestales como sumideros de carbono. *In Actas de XI Congreso Mundial Forestal: Recursos Forestales y Arboles.*, 1, 13–22.
- Casanova, F. L., Petit, J. A., & Solorio, J. S. (2011). Los Sistemas Agroforestales Como Alternativa a La Captura De Carbono En El Trópico Mexicano. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, XVII(1), 133–143. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.08.047>
- Chávez-Aguilar, G., Ángeles-Pérez, G., Pérez-Suárez, M., López-López, M. A., García-Moya, E., & Wayson, C. (2016). Distribución de biomasa aérea en un bosque de *Pinus patula* bajo gestión forestal en Zacualtipán, Hidalgo, México. *Madera y Bosques*, 22, 23–36.
- Concha, J., Alegre, J. C., & Pocomucha, V. (2007). *Determinación de las reservas de carbono en la biomasa aérea de sistemas agroforestales de Theobroma cacao L. en el departamento de San Martín, PERU*. *Ecología Aplicada*, 6(1,2), 75–82.
- Congedo, L. (2018). Semi-Automatic Classification Plugin Documentation. *Institute for Environmental Protection and Research*, 1(September 2016), 203. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29474.02242/1>
- Chuvieco, E. (2016). *Fundamentals of Satellite Remote Sensing*. An environmental approach. Boca ratón, Florida, United States of America: CRC Press.
- Dagnino, J. (1980). Estadística aplicada. In *Editora científico técnico*.
- Días, G. J. J. (2015). Estudio de índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión [Universidad

- Complutense de Madrid]. In *Universidad Complutense De Madrid* (Issue Junio). http://eprints.ucm.es/31423/1/TFM_Juan_Diaz_Cervignon.pdf
- Díaz, R., Acosta, M., Carrillo, F., Buendía, E., Flores, E., & Etchevers, J. (2007). Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham. *Madera y Bosques*, 13(1), 25–34. http://www1.inecol.edu.mx/myb/resumeness/13.1/MB_2007_13-1_025-034.pdf
- Díaz-Franco, R. (2007). Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham. *Madera bosques*, 25-34.
- Echeverría, A., Pachacama, R., Villaverde, Y., & PROAÑO, N. (2018). *Cálculo de biomasa aérea y carbono capturado de la reserva Yanacocha a través de imágenes satelitales*. *Geoespacial*, 15, 33–44.
- Eichhorn, P. C., Lugo, G. G. A., & Vasquez, H. J. C. (2018). *Diseño metodológico para la estimación de captura de carbono en áreas ideales de restauración ecológica a partir de imágenes satelitales caso de estudio: Municipio De Pesca, Boyacá* (Vol. 9, Issue 1). Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Flórez, López, R., Lévy, Mangin, J. P. y Fernández Fernández, J. M. (2008). Las redes neuronales artificiales. Netbiblo: Tirant lo Blanch.
- Gasparri, N. I., Parmuchi, M. G., Bono, J., Karszenbaum, H., & Montenegro, C. L. (2007). Utilidad de imágenes Landsat 7 ETM+ de diferentes fechas para la estimación de biomasa aérea en bosques subtropicales secos de Argentina. *Congreso de La Asociación Española de Teledetección*, 9. https://www.academia.edu/14746785/Utilidad_de_imágenes_Landsat_7_ETM_de_diferentes_fechas_para_la_estimación_de_biomasa_aérea_en_bosques_subtropicales_secos_de_Argentina
- Gobierno Regional de Amazonas. (2019). *Certificado de Inscripción en el registro nacional de plantaciones forestales*. (p. 13).
- Gonzalez, S., Alejandro, F., Guncay, T., & Sebastián, W. (2020). *Estimación del carbono almacenado en la biomasa aérea, necromasa (hojarasca) y en el suelo en un bosque de pino en la comuna Paquizhapa (provincia de Loja)*. Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca.

- Haykin, S. (2001). *Redes neurais princípios e aplicações* (segunda ed).
- Herrera Castellanos, M. (2009). *Fórmula para cálculo de la muestra poblaciones finitas*.
- Ibáñez, Á. M. (2013). *Metodología para la estimación de carbono en bosque mediterráneo chileno mediante imágenes hiperespectrales*. Universidad de Zaragoza.
- Inoñan, O. P. (2014). *Maestría en ciencias mención: planificación para el desarrollo línea: desarrollo y medio ambiente*. Universidad Nacional de Cajamarca.
- León, P., & Rodríguez, F. (2017). Valor económico del almacenamiento de carbono en los páramos de la Reserva Ecológica El Ángel. *Revista Geoespacial*, 14(1), 65-82.
- Martínez, J., & Fernández, A. B. (2004). *Cambio climático: una visión desde México*.
- Maselli, F., Vaccari, F. P., Chiesi, M., Romanelli S., y D'Acqui, L. P. (2017). *Modelling and analyzing the water and carbon dynamics of Mediterranean macchia by the use of ground and remote sensing data*. *Ecological Modelling*, vol. 351, pp. 1-13, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2017.02.012>
- Mazuelos, Z. E. (2021). *Identidad cultural y su influencia en el desarrollo turístico del pueblo alfarero de Huancas, Provincia Chachapoyas, Región Amazonas, 2020* [Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas]. [http://repositorio.untrm.edu.pe/bitstream/handle/UNTRM/1482/CHAPA GRANDEZ SALLY PATRICIA.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.untrm.edu.pe/bitstream/handle/UNTRM/1482/CHAPA%20GRANDEZ%20SALLY%20PATRICIA.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Molano Morales, M. A., & Díaz Fonseca, X. S. (2001). Cuantificación y valoración económica de la captura de CO₂ por plantaciones del genero *Eucaiyptus* establecidas por el Preca en las cuencas carboníferas de Cesar , Valle del Cauca Cauca y Altiplano Cundiboyacense. *Colombia Forestal*, 7(14), 87–101.
- Moreno, R., Irigoyen, A. I., & Studdert, G. A. (2014). Aplicación de redes neuronales artificiales para estimar el carbono organico del suelo. XXIV Congreso Argentino de La Ciencia Del Suelo, 7.
- Norverto, C. A. (2006). *La fijación de CO₂ en plantaciones forestales y en productos de madera en Argentina*. Buenos Aires, Argentina. Editorial GRAM.
- Oliva, M., Culqui Mirano, L., Leiva, S., Collazos, R., Salas, R., Vásquez, H., & 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>
- Parky, E., Moreno, F., & 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/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2017.2.a04>
- Pérez, J. G. (2016). Estimación de la captura de carbono empleando herramientas de análisis espacial en las zonas forestales de la cuenca de Cuitzeo. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Phillip Eichhorn, C., Guzman Lugo, G. A., & Hurtado Vásquez, J. C. (2018). Diseño metodológico para la estimación de captura de carbono en áreas ideales de restauración ecológica a partir de imágenes satelitales.
- Quiceno Urbina, N. J., Tangarife Marín, G. M., & Álvarez León, R. (2016). Estimación del contenido de biomasa, fijación de carbono y servicios ambientales, en un área de bosque primario en el resguardo indígena Piapoco Chigüiro-chátare de Barrancominas, departamento del Guainía (Colombia). *Luna Azul*, 43(43), 171–202.
<https://doi.org/10.17151/luaz.2016.43.9>
- Raciti, S. M., Hutyrá L. R. y Newell, J. D. D. (2014). *Mapping carbon storage in urban trees with multi-source remote sensing data: Relationships between biomass, land use, and demographics in Boston neighborhoods*. *Science of the Total Environment*, vol. 1, pp. 72-83, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.08.070>
- Rodríguez, M. V. M., & Bullock, S. H. (2013). Comparison of vegetation indexes in the Sonoran desert incorporating soil and moisture indicators and application to estimates of LAI. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 4(4), 611–623.
- Sánchez, A. (2016). Estimación del carbono orgánico sobre el suelo, a partir de imágenes satelitales LANDSAT 7 ETM+, en el bosque de ceja Andina de la comunidad indígena Huangras - Achupallas - Chimborazo. 1–73.
[http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/4996/1/tesis-Fernanda Sánchez.pdf](http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/4996/1/tesis-Fernanda%20S%C3%A1nchez.pdf)
- Sánchez, L. y Reyes, O. (2015). *Medidas de adaptación y mitigación frente al cambio*

climático en América Latina y el Caribe. Una revisión general. CEPAL. Santiago de Chile, Chile.

- Sever, M. Z. O., Alberti, G., Vedove, G. D., & Marjanovi'c, H. (2019). Temporal Evolution of Carbon Stocks , Fluxes and Carbon Balance in Pedunculate Oak Chronosequence under Close-To-Nature Forest Management. *Forests*, 10(9), 814. <https://doi.org/10.3390/f10090814>
- Simegn, T. Y., Soromessa T. y Bayable, E. (2014). *Forest Carbon Stocks in Lowland Area of Simien Mountains National Park: Implication for Climate Change Mitigation*, *Science, Technology and Arts Research Journal*, vol. 3, n.º 3, pp. 29-36, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.4314/star.v3i3.5>
- Silleos, N. G., Alexandridis, T. K., Gitas, I. Z., & Perakis, K. (2006). Vegetation indices: Advances made in biomass estimation and vegetation monitoring in the last 30 years. *Geocarto International*, 21(4), 21–28. <https://doi.org/10.1080/10106040608542399>
- Vega, P. J. A. (2018). *Modelación y estimación de la captura de carbono, en plantaciones comerciales forestales maderables, no maderables y reforestaciones, en los municipios de san José villa de Allende y villa Victoria, utilizando sistemas de información geográfica.* (Tesis posgrado). Universidad Autónoma del estado de México, México. <http://hdl.handle.net/20.500.11799/106143>
- Vicharnakorn, P., Shrestha, R. P., Nagai, M., P. Salam, A. y S. Kiratiprayoon. (2014). *Carbon Stock Assessment Using Remote Sensing and Forest Inventory Data in Savannakhet, Lao PDR*, *Remote Sensing*, vol. 6, n.º 6, pp. 5452-5479, 2014. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs6065452>
- Villar, R., Ruiz-Robledo, J., Quero, J. L., Poorter, H., Valladares, F., & Marañón, T. (2004). *Tasas de crecimiento en especies leñosas: aspectos funcionales e implicaciones ecológicas.* In *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante.*
- Wilson, R. Y. C., & Abel, C. (2007). *Cuantificación de la captura y almacenamiento de carbono en sistema agroforestal y forestal en seis sitios de cuatro municipios de Nicaragua.* Universidad Nacional Agraria.

ANEXOS

Anexo 1. Panel fotográfico



Foto 1. Medición de DAP



Foto 2. Estimación de altura

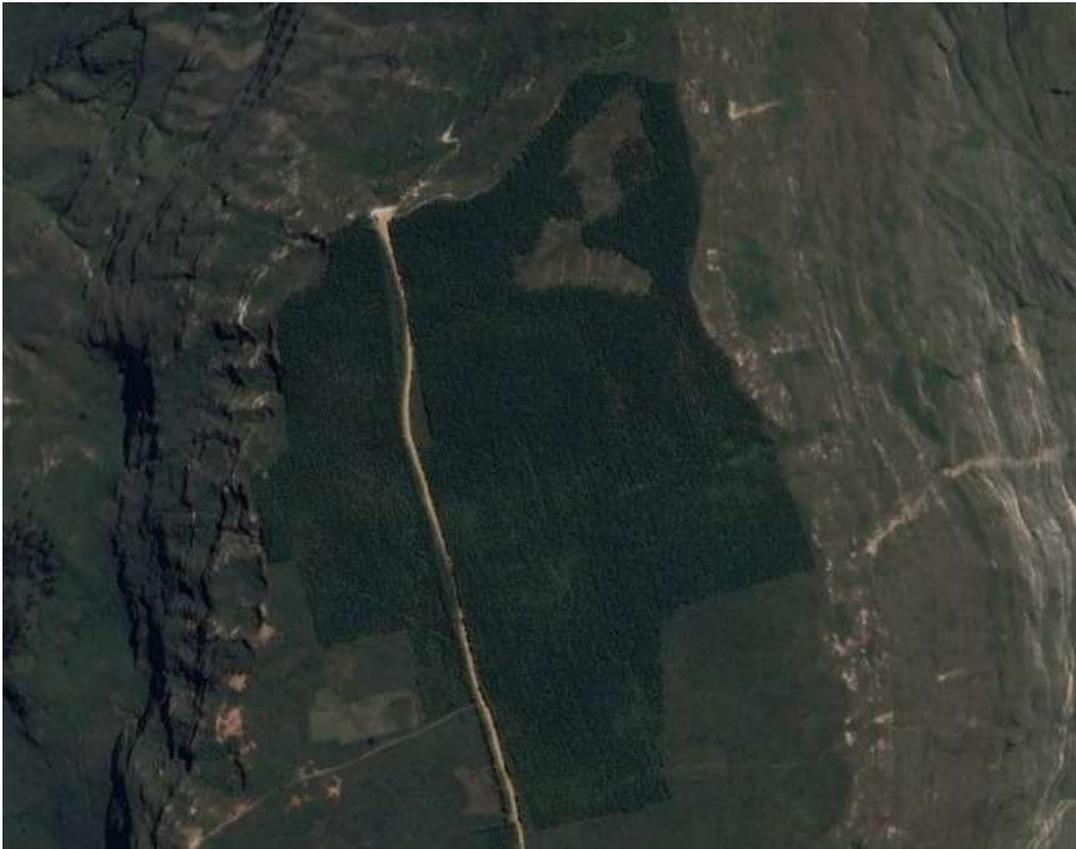


Foto 3. Georreferenciación



Foto 4. Extracción de muestra con barreno de Pressler

Anexo 2. Vista panorámica del área de estudio



Anexo 3. Dispersión de parcelas de evaluación

