

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Ciencias Biológicas y Ambientales**

**Uso de imágenes satelitales, ecuaciones alométricas y validación de campo para la cuantificación de biomasa aérea y stock de carbono en un bosque remanente de vegetación de Valle Seco Interandino de la Provincia de Pichincha, Ecuador.**

**Gabriela Dayana Zambrano Torres**

**Biología**

Trabajo de integración curricular presentado como requisito  
para la obtención del título de  
Licenciada en Biología

Quito, 20 de enero de 2020

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ  
COLEGIO DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y  
AMBIENTALES

**HOJA DE CALIFICACIÓN  
DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**

Uso de imágenes satelitales, ecuaciones alométricas y validación de campo para la cuantificación de biomasa aérea y stock de carbono en un bosque remanente de vegetación de Valle Seco Interandino de la Provincia de Pichincha, Ecuador.

**Gabriela Dayana Zambrano Torres**

**Calificación:**

**Nombre del profesor, Título académico**

Gonzalo Rivas-Torres, Ph.D.

**Firma del profesor:**

Quito, 20 de enero de 2020

### **Derechos de Autor**

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante: \_\_\_\_\_

Nombres y apellidos: Gabriela Dayana Zambrano Torres

Código: 00132066

Cédula de identidad: 0603824434

Lugar y fecha: Quito, 20 de enero de 2020

## RESUMEN

Para mejorar los planes de manejo sostenibles sobre mitigación de impacto ambiental y conservación en los bosques tropicales del planeta, es necesario generar información preliminar que especifique la cantidad de biomasa y carbono que estos bosques captan. Principalmente, esta información es crucial para bosques tropicales remanentes, en peligro crítico y poco conocidos en su ecología, como es el caso de los Bosques de Valle Seco Interandino (BVSI). Por consiguiente, el presente estudio buscó cuantificar la biomasa aérea y el stock de carbono en un último remanente de este tipo de bosque seco en la provincia de Pichincha, Ecuador. Esto fue posible mediante el establecimiento de transectos de  $50 \times 2 \text{ m}$  como unidad de muestreo. Una vez establecidos un total de 20 transectos, (5 por cuatro tipos de cobertura identificados en este Bosque), se midieron y registraron a todos los individuos  $\geq 2 \text{ cm}$  de DAP o diámetro en la base, y una altura  $\geq 1,30 \text{ cm}$ , también se calculó el porcentaje de cobertura de cada arbusto y la altura de cada individuo enraizado dentro de los transectos. Después de haber obtenido estas medidas, se empleó una variación de las ecuaciones alométricas ya existentes para especies de bosque seco, para estimar la biomasa de cada individuo y cada transecto. Paralelamente, usando una imagen satelital Sentinel 2 y mediante el uso del algoritmo MaxEnt, se correlacionaron las variables obtenidas a partir de esta fotografía con la densidad de la vegetación, para así estimar un valor de biomasa que fue validado y contrastado con los datos obtenidos mediante levantamiento en campo. Este estudio determinó que el total de biomasa aérea y stock de carbono es superior en el área denominada como “Zona de restauración natural” identificada y analizada en este bosque, con 71,88 tn de biomasa y 35,94 tn de carbono en 25,18 ha, mientras que la “Zona de reforestación nueva” con un área de 4,47 ha presentó los valores más bajos de biomasa y carbono, con 46,06 y 23,03 tn respectivamente. En general se estimó que en total la vegetación arbórea y arbustiva de este bosque presentan un stock de carbono de aproximadamente 2408 tn, cifra cercana a las 2294 tn de carbono registradas por la metodología de imagen satelital. Este estudio además de comparar dos metodologías de utilidad, generó información fundamental para un tipo de bosque amenazado y de gran importancia en el Ecuador.

Palabras clave: biomasa aérea, stock de carbono, transecto, ecuaciones alométricas, imagen satelital, Bosque de Valle Seco Interandino.

## ABSTRACT

In order to improve sustainable management plans on environmental impact mitigation and conservation in the tropical forests of the planet, it is necessary to generate preliminary information that specifies the amount of biomass and carbon that these forests capture. This information is crucial for remaining tropical forests, critically endangered and poorly known in their ecology, as is the case of the Interandino Dry Valley Forests (BVSI in Spanish). Therefore, the present investigation sought to quantify the aerial biomass and the carbon stock in a last remnant of this type of dry forest located in the province of Pichincha, Ecuador. This was possible by establishing transects of 50 x 2 m as a sampling unit. Once a total of 20 transects were established, (5 by four types of coverage identified in this Forest), all individuals  $\geq 2$  cm of DBH or diameter at the base and with a height  $\geq 1,30$  cm were measured and recorded. Also the percentage of coverage of each bush rooted within the transects was calculated. After obtaining these measures, a variation of the existing allometric equations for dry forest species was used to estimate the biomass of each individual and each transect. In parallel, using a Sentinel 2 satellite image and using the MaxEnt algorithm, the variables obtained from this photograph were correlated with the density of the vegetation, in order to estimate a biomass value that was validated and contrasted with the data obtained in the field. This study determined that the total aerial biomass and carbon stock is higher in the area called "Natural Restoration Zone" identified and analyzed in this forest, with 71.88 tons of biomass and 35.94 tons of carbon in 25, 18 ha, while the "New reforestation zone" with an area of 4.47 ha had the lowest biomass and carbon values, with 46.06 and 23.03 tn respectively. In general, it was estimated that the tree and shrub vegetation of this forest have a carbon stock of approximately 2408 tons in total, a figure close to 2294 tons of carbon recorded by the satellite image methodology. This study, in addition to comparing two useful methodologies, generated fundamental information for a type of threatened forest of great importance in Ecuador.

Keywords: aerial biomass, carbon stock, transect, allometric equations, satellite image, Dry Interandine Valley

**Tabla De Contenido**

<b>Introducción</b> .....	<b>9</b>
<b>Objetivos</b> .....	<b>13</b>
Objetivo general:.....	13
Objetivos específicos: .....	13
<b>Metodología</b> .....	<b>13</b>
Área de estudio .....	13
Objetivo 1 .....	15
Colección de datos en campo. ....	15
Descripción de los transectos. ....	16
Análisis de datos.....	17
Objetivo 2 .....	19
Imagen satelital. ....	19
Descripción del modelamiento espacial. ....	19
Análisis datos. ....	20
Objetivo 3 .....	21
<b>Resultados</b> .....	<b>22</b>
<b>Discusión</b> .....	<b>32</b>
<b>Conclusiones</b> .....	<b>41</b>
<b>Referencias bibliográficas</b> .....	<b>42</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores totales de biomasa en toneladas, a partir de los datos de cobertura aplicando la Ecuación 1, para las 20 unidades de muestreo establecidas en la Meseta de Caraburo. ....	22
Tabla 2. Promedio de biomasa por tipo de cobertura, calculada a partir de los datos de porcentajes de cobertura obtenidos de los arbustos registrados dentro de cada transecto establecido en el área de estudio. ....	23
Tabla 3. Valores totales de biomasa, a partir de los datos de DAP o diámetro en la base, por transecto, por hectárea en kilogramos y en toneladas, aplicando la Ecuación 2; para las 20 unidades de muestreo establecidas en la Meseta de Caraburo. ....	24
Tabla 4. Promedio de biomasa por tipo de cobertura, calculada a partir del DAP o diámetro en la base, obtenido de los árboles y arbustos registrados en cada transecto establecido dentro del área de estudio. ....	25
Tabla 5. Valores totales de biomasa por hectárea, obtenidos del análisis de la imagen Satelital Sentinel 2 para los 4 tipos de cobertura identificados en la Meseta de Caraburo. ....	25
Tabla 6. Valor total de biomasa aérea y stock de carbono por tipo de cobertura obtenido por ambas metodologías establecidas para el estudio en la Meseta de Caraburo. ....	28
Tabla 7. Peso total de las especies registradas en los 20 transectos establecidos en el área de estudio (Meseta de Caraburo). ....	30

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización de los transectos dentro de los 4 tipos de cobertura identificados (Área de reforestación antigua, Área de reforestación nueva, Zona de conservación y Zona de restauración natural), en el noroccidente de la Meseta del Caraburo. ....	15
Figura 2. Mapa que presenta la biomasa (en kg) distribuida en el área de estudio obtenido en base a los análisis utilizando la imagen Sentinel 2. ....	27



## INTRODUCCIÓN

Los bosques tropicales albergan alta biodiversidad y se caracterizan por contribuir a mantener un ciclo neutral de carbono, ayudan a captar el exceso de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) de la atmósfera y lo transforman en biomasa a través de la fotosíntesis (Lewis, 2006). Sin embargo y a pesar de su importancia, estos bosques están en riesgo por la deforestación antropogénica y al efecto del cambio climático (Malhi et al., 2004). Este impacto ocasiona que sea más difícil cada vez controlar el calentamiento global y mantener su efecto por debajo de los 2°C, con respecto a los niveles preindustriales, el cual se ha determinado como el punto de inflexión para cambios irreversibles en los ecosistemas y en el sistema climático del planeta (IPCC, 2019). Esto ha conllevado a que la mayoría de países del mundo pertenecientes a los acuerdos internacionales contra el cambio climático se hayan comprometido a disminuir la deforestación y degradación de sus bosques (Mitchar, 2018). Igualmente al momento, existen advertencias que precisan que, si no existe una disminución considerable de las emisiones de combustibles fósiles y no aumentan los esfuerzos por capturar carbono, se espera que para el año 2400 los seres humanos hayan liberado cerca de 5000 gigatoneladas de carbono (Gt C) a la atmósfera desde que dio inicio la revolución industrial (Zachos et al., 2008) y por consiguiente representaría repercusiones graves sobre la vida en el planeta.

A pesar del importante desafío político en el establecimiento de un mecanismo global para financiar actividades de mitigación, es su implementación la que depende principalmente de una base confiable de protocolos basados en el reporte, monitoreo y verificación del almacenamiento de carbono (Chave et al., 2014). Así mismo, la preocupación por el rápido ritmo con el que aumenta la cantidad de carbono en la atmósfera ha impulsado la búsqueda de métodos eficientes de secuestro de carbono en la

biomasa vegetal. Generalmente, los árboles que se caracterizan por tener una alta densidad y una vida más larga almacenan una mayor cantidad de carbono que los árboles de baja densidad y de crecimiento rápido. Sin embargo, esto no significa que las compensaciones de carbono que involucren árboles grandes y de crecimiento lento sean necesariamente mejores, pero si es importante especificar la escala de tiempo del proyecto de compensación propuesto y definir si el objetivo es almacenar carbono o eliminar activamente el carbono de la atmósfera (Schulte & Shöne, 1996).

Entre las diferentes categorías de bosques tropicales del mundo, los bosques secos abarcan menos de la mitad de éstos y desempeñan un papel clave dentro del ciclo global del carbono frente al cambio climático (Lima et al., 2017). No obstante, son uno de los ecosistemas forestales más amenazados y menos estudiados (Lima et al., 2017). En el Ecuador, aproximadamente, cerca del 50% de los bosques secos ha sufrido deforestación por las actividades agrícolas y antropogénicas, causando que, en el callejón interandino, los Bosques de Valle Seco - BSVI se encuentren aislados en remanentes (Troya et al., 2016). La vegetación del BSVI se caracteriza por la carencia de un dosel continuo, un tamaño pequeño de individuos, plantas espinosas y parches de suelo desnudo entre los árboles (Aguirre, 2012). Este estudio se realizó en un último remanente de este tipo de bosques el cual se encuentra bajo el manejo de una empresa privada, la cual ha dirigido diferentes usos a las áreas de la zona provocando un crecimiento diferente del material vegetal en el tiempo, a la asociación en el paisaje de los factores del suelo constantes con el tiempo, lo cual se conoce como cronosecuencia y permite estudiar la dinámica temporal de las comunidades vegetales en diversas escalas (Walker et al., 2010).

Actualmente para realizar estudios que estimen la tasa de secuestro de carbono en BSVI es necesario el empleo de modelos que cuantifiquen la biomasa y el carbono, pero usados en regiones diferentes con ecosistemas similares, esto se presenta como una limitante

debido a las distintas condiciones que dirigen el crecimiento vegetal, como el clima, la genética y los suelos de estos bosques. Estos factores determinan el aumento de la biomasa y por consecuencia también la fijación de CO<sub>2</sub> (Álvarez, 2008). Debido a esto es importante generar modelos locales que permitan realizar estimaciones más precisas de la cantidad de biomasa y stock de carbono que pueden ser registrados en los BVSI.

Inicialmente, para poder implementar planes de manejo forestal que incrementen la capacidad de captura de carbono de los bosques a largo plazo – incluidos los BVSI, es necesario generar prácticas que permitan calcular el almacenamiento actual de biomasa y carbono. Este tipo de investigaciones se han orientado a la determinación de la biomasa y carbono almacenados en forma sólida en los árboles, considerando la dificultad para medir el flujo gaseoso que forma parte del ciclo de carbono entre la atmosfera y el ecosistema forestal (Nadler et al., 2001); siendo el método más preciso para estimar estos parámetros la tala de árboles y arbustos y el pesaje por sus partes para determinar el peso seco de los mismos, pero este es un método destructivo, pues requiere derribar la vegetación para realizar una estimación precisa de la biomasa y el carbono (Clark et al., 2001).

No obstante, hay alternativas a emplear como una evaluación de la biomasa aérea de los arboles forestales, misma que permite calcular la biomasa y carbono usando mediciones de campo en parcelas de estudio permanentes. La determinación de la biomasa generalmente incluye la medición de parámetros como el tamaño del árbol/arbusto, el diámetro del tronco a la altura del pecho (DAP) o suelo para el caso de los arbustos y la altura de los mismos. Estas medidas son posteriormente convertidas a biomasa utilizando ecuaciones alométricas empíricas (Massada et al., 2006) que en la mayoría de los casos pueden ser específicas o desarrolladas por tipo de bosque. Las ecuaciones alométricas son las herramientas más utilizadas para realizar la estimación total de biomasa aérea,

permitiendo modelar los incrementos o decrementos del carbono almacenado en los bosques durante periodos de tiempo relativamente cortos (Basuki et al., 2009).

Una interesante alternativa para obtener datos de biomasa sin realizar mediciones exhaustivas en campo se genera a partir de imágenes satelitales, puesto que estas son cada vez más disponibles para muchos lugares del planeta y con extensa cobertura espacial y temporal (Massada et al., 2006). De hecho, en investigaciones recientes, se ha demostrado que la información obtenida de las imágenes satelitales se correlaciona con la estimación de la biomasa aérea, a partir de parámetros de la copa, utilizando diferentes métodos con datos de detección remota, lo que los hace fiables al momento de realizar dichos cálculos (Sousa et al., 2015). Si bien estas técnicas brindan información útil, pueden propagar errores durante el proceso de estimación de biomasa. Si los datos no se toman con precisión se pueden transformar en una fuente de error, y esta información puede afectar la calibración y validación del modelo, por lo que se ha sugerido que las imágenes satelitales se puedan presentar como un complemento eficaz a los datos obtenidos en campo, logrando así que el monitoreo sea más económico al disminuir la frecuencia de mediciones en campo (Lee et al., 2016).

Por lo antes expuesto, el objetivo principal de este estudio fue estimar la biomasa aérea y el almacenamiento de carbono total en un último remanente de Bosque de Valle Seco Interandino de Pichincha. Específicamente se comparó los valores de la biomasa y stock de carbono entre tipos y cronosecuencias de cobertura identificados en el remanente de estudio. Así al emplear dos metodologías, la imagen satelital y levantamiento en campo, para calcular la biomasa y stock de carbono, se realizó una comparación metodológica en cuanto a los valores totales y para cada tipo de cobertura vegetal. Finalmente, después de obtener los resultados, se comparó los datos obtenidos con valores de biomasa y stock de carbono en bosques similares en Sudamérica.

## OBJETIVOS

### Objetivo general:

- Calcular el stock de carbono en la biomasa aérea en un valle seco interandino del norte del Ecuador

### Objetivos específicos:

- Comparación de la biomasa y stock de carbono entre tipos y cronosecuencias de cobertura y especies en un valle seco interandino
- Comparación de metodologías - imagen satelital y levantamiento en campo- para calcular la biomasa y stock de carbono entre tipos y cronosecuencias de cobertura en un valle seco interandino
- Comparación de biomasa de este con otros bosques similares/o no similares en Sudamérica.

## METODOLOGÍA

### Área de estudio

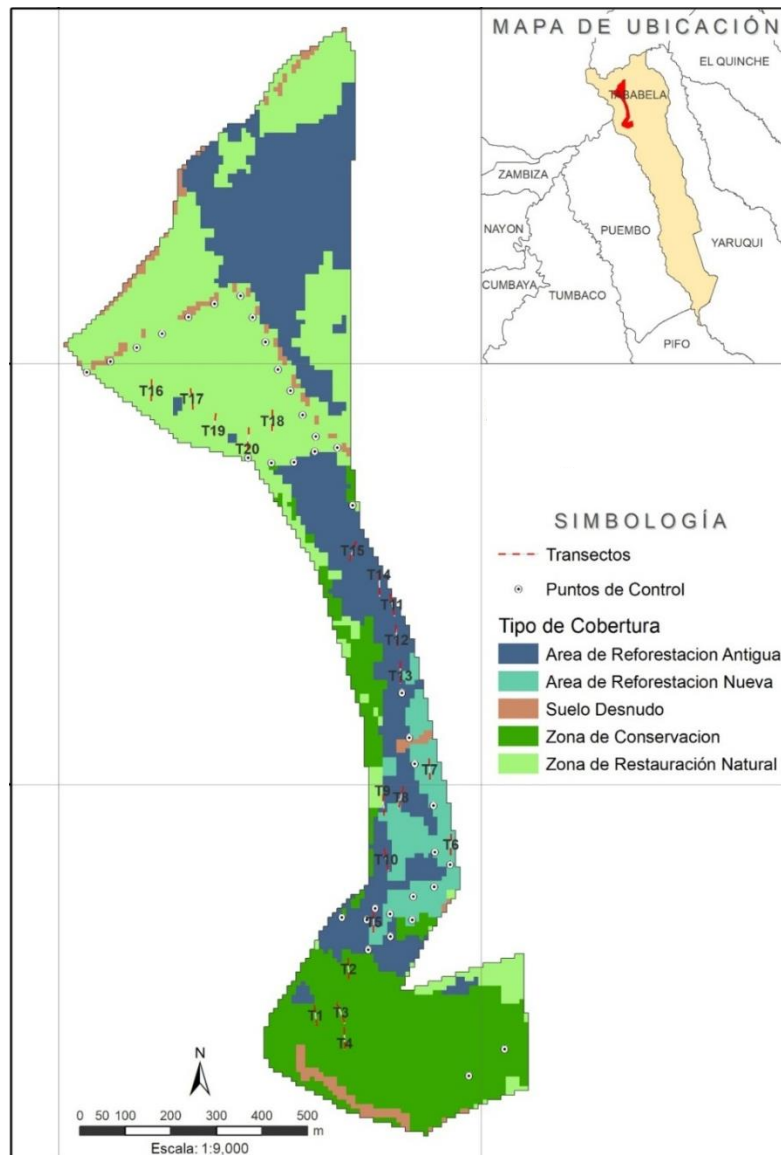
Los Bosques de Valle Seco Interandino se encuentran ubicado en los valles secos de las inmediaciones de la cordillera de los andes ubicados entre 1800 y 2600 m.s.n.m, identificados desde Imbabura hasta Azuay, destacándose entre estos los valles de Chota (Imbabura), Guayllabamba (Pichincha) Patate (Tungurahua) y Chuacán (Chimborazo). Estos bosques se caracterizan por ser zonas de baja precipitación (entre 500 y 1000 mm<sup>3</sup> al año) y una temperatura de entre 20°C y 27°C. El tipo de vegetación que predomina en estos bosques es normalmente arbustiva, xerofítica, espinosa, con poca densidad y con una altura que llega hasta 4 m, aunque, en lugares protegidos o de acceso restringido se pueden encontrar bosques que pueden alcanzar alturas de hasta de 8 m, siendo oportuno

anotar que la diversidad de especies arbóreas es baja. Las Fabaceae y Mimosaceae son las familias que predominan y las especies frecuentes de estos bosques son: *Acacia macrantha*, *Croton wagneri*, *Caesalpinia spinosa*, *Dodonaea viscosa* y *Schinus molle* (Aguirre et al., 2006).

La falta de estudios de los bosques secos interandinos aún deja vacíos de información respecto a las comunidades biológicas de flora y fauna. Muchas especies vegetales y animales que habitan estos bosques presentan un rango de distribución reducido, producto de las actividades humanas que causan fragmentación de hábitats, por lo que estas especies han llegado a encontrarse amenazadas (Albuja, 2011).

El remanente usado en este estudio corresponde a un área total de 73,06 hectáreas, las cuales se encuentran, ubicadas al oeste de la Meseta de Caraburo, una planicie rodeada de quebradas. El tipo de bosque de esta región ha sido clasificado por el Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE) como bosque seco del Callejón Interandino, el cual presenta signos de haber sufrido una gran pérdida de su extensión original, debido a que ha sido explotado para la extracción de diferentes tipos de materia prima, y a pesar de ser el más deforestado del país aún presenta una flora única.

Para este estudio se buscó realizar comparaciones en cuanto a biomasa aérea y stock de carbono mediante la disposición de transectos en diferentes tipos de cobertura encontrados dentro del área total, identificados según el tipo de uso atribuido por la entidad de manejo de la zona, por lo que se establecieron 4 zonas dentro del área de estudio, (Área de reforestación antigua, Área de reforestación nueva, Zona de conservación y Zona de restauración natural). En la Figura 1 se puede observar el área total de estudio y la localización de los transectos por tipo de cobertura.



**Figura 1.** Localización de los transectos dentro de los 4 tipos de cobertura identificados (Área de reforestación antigua, Área de reforestación nueva, Zona de conservación y Zona de restauración natural), en el noroccidente de la Meseta del Caraburo.

## Objetivo 1

### Colección de datos en campo.

Para responder el primer objetivo, es decir realizar la medición de biomasa y captura de carbono en el área total de estudio, se utilizó transectos de  $50 \times 2 \text{ m}$  ( $100 \text{ m}^2$ ) correspondiente al 0.01 de una hectárea. Por cada tipo de cobertura identificada se

establecieron 5 transectos al azar, obteniendo un total de 20 transectos que equivalen al 0,1 de hectárea, la cual es una medida base para realizar comparaciones de estudios vegetales con ecosistemas similares, debido al uso generalizado de los transectos. Esta metodología es ampliamente usada en muestreos rápidos de vegetación de bosques deciduos y semideciduos (Gillespie et al., 2000). En la Figura 1 se muestra la disposición de las unidades de muestreo de cada tipo de cobertura vegetal en el área total.

### **Descripción de los transectos.**

Se establecieron 5 transectos de 50x2 m en cada tipo de cobertura anteriormente definido. Por lo tanto, se establecieron un total de 20 transectos repartidos en 73 hectáreas. Cada transecto medido fue designado con un código único (T1-T20), el cual fue registrado mediante georreferenciación al inicio y final de cada transecto. Para facilitar la identificación de las unidades de muestreo, se colocó una placa de aluminio al inicio y final de cada transecto. Al inicio del transecto el código único incluye la letra S (Sur) pues los transectos fueron medidos de sur a norte, y por ello, en el final del transecto el código viene acompañado de la letra N (Norte). La mayoría de transectos inician desde árboles de *Acacia macrantha*, por ser de los más altos individuos en el área de estudio, estos ayudan a visualizar la placa de aluminio que puede contribuir a posteriores censos.

En cada unidad de muestreo se registraron y midieron todos los individuos enraizados dentro del transecto, cuyo diámetro sea igual o mayor a 2 cm a la altura del pecho (DAP) o diámetro en la base. En el caso de individuos que presentaron varias ramas dentro del rango de 2 cm de DAP o base, se realizó la suma de todos los diámetros que cumplieran con la medida estándar para obtener un diámetro total para ser utilizado en los posteriores análisis. También, se registraron a todos los arbustos enraizados en el transecto, cuya altura era igual o mayor a 1,30 cm desde el suelo, incluso si no cumplieran con el estándar de la medida de 2 cm para ninguna de sus ramas. De esta forma, en lugar de medir el



diámetro, se midió el radio del individuo (medido desde la mitad del arbusto hasta el final de su copa en forma horizontal). Para estos ejemplares, se calculó el porcentaje de cobertura con el fin de dar una estimación más real de la cantidad de biomasa de cada unidad de muestro. Adicionalmente, se midió la altura de cada árbol/arbusto y se recolectó una muestra por especie para realizar la posterior identificación en el Herbario Nacional (QCNE).

### **Análisis de datos.**

Dentro de cada transecto se obtuvo el porcentaje de cobertura de cada individuo que no cumplió con la medida estándar de 2 cm de diámetro a la altura del pecho o en la base. Para calcular la biomasa aérea, se realizó la sumatoria de los datos de cobertura individuales para obtener el valor total de cobertura vegetal por cada unidad de muestreo. Seguidamente, con el valor total de cobertura por transecto se realizó el cálculo de biomasa para cada unidad de muestro utilizando la Ecuación 1, la cual fue estandarizada para utilizar el porcentaje de cobertura por transecto y así obtener un valor genérico de biomasa en toneladas por hectárea.

Ecuación 1 (según Chojnacky y Milton, 2010):

$$\text{Biomasa}_T = \text{Exp} [-3.96457 + 1.08631 \text{ Ln (cobertura)}]$$

Donde la  $\text{Biomasa}_T$  o el peso seco del arbusto se expresa en MG (mega gramos = 1 tonelada) por hectárea, y Ln= logaritmo natural y la cobertura se refiere al porcentaje de cobertura vegetal para cada transecto.

Los cálculos de biomasa obtenidos para cada uno de los 5 transectos se utilizaron para obtener un promedio por tipo de cobertura, el cual se sumó al valor por hectáreas obtenido del cálculo de biomasa a partir de los datos de diámetros de los individuos que si cumplieron con el valor estándar.

Para realizar el cálculo de biomasa a partir de los datos obtenidos de los individuos que presentaron un diámetro igual o mayor a 2 cm de DAP o en la base, se utilizó la Ecuación 2. Esta ecuación es identificada como un estimador matemático significativo para especies de géneros como *Dodonea*, característicos de bosques secos (Rojas-García et al. 2015).

Ecuación 2 (según Rojas-García et al., 2015):

$$[258.487]*[[3.1416]*[[[DAP^2]/4]]^{0.968}]$$

Donde el DAP puede ser reemplazado por el diámetro a la altura del pecho o diámetro en la base de cada individuo. Una vez obtenido el valor de la biomasa por individuo, se realizó la sumatoria de todas las plantas dentro de cada transecto para así obtener el cálculo de biomasa por cada unidad de muestreo. También, se obtuvo el promedio de biomasa por cada tipo de cobertura vegetal, obtenido mediante la suma de biomasa de los 5 transectos dentro de cada tipo de cobertura y dividiendo el valor para 5, que corresponde a la cantidad de transectos establecidos en cada una de las zonas identificadas en el área de estudio.

Los valores de biomasa aérea obtenidos del diámetro y de la cobertura de cada individuo en cada unidad de muestreo, fueron sumados para obtener el total de biomasa en toneladas por hectárea para cada tipo de cobertura dentro del área de estudio. Finalmente, se multiplicaron los totales de la biomasa aérea por el total de hectáreas de cada tipo de cobertura vegetal, para así obtener el peso en toneladas de materia viva por tipo de unidad florística.

Cuando se han obtenido los totales de biomasa por tipo de cobertura, se utilizó el coeficiente universal de transformación de carbono (Ecuación 3), que permite calcular el carbono almacenado a partir de los datos de biomasa aérea. El coeficiente se deriva del

precepto que plantea que el carbono conforma la mitad de la biomasa de los organismos vegetales (Quiceno et al., 2016). A su vez, estos valores se multiplicaron por el total del área de cada tipo de cobertura vegetal para así obtener el stock de carbono por cada una de las categorías y el total para las 73.06 hectáreas del área de estudio.

Ecuación 3 (según Woodall et al. 2011) :

$$\text{Carbono total} = \text{Biomasa total} * 0.5$$

## **Objetivo 2**

### **Imagen satelital.**

Para responder al segundo objetivo, se realizó la medición de stock de carbono, en las 73.06 hectáreas de área de estudio, mediante el uso de una imagen satelital adquirida el 12 de abril del 2018 por el sensor MultiSpectral Instrument (MSI) del satélite europeo Sentinel 2, con una resolución espacial de 20 metros. La identificación de los diferentes tipos de cobertura vegetal establecidos anteriormente, se los realizó a través de una clasificación orientada a objetos, utilizando las características espectrales de la imagen y contextuales del área de estudio (Benítez, 2015). A partir de este proceso, se obtuvo un mapa preliminar de la distribución espacial de los cuatro tipos de vegetación descritos en el área total de estudio, mismo que fue validado mediante puntos de control identificados en el proceso de campo (Figura 1).

### **Descripción del modelamiento espacial.**

Para modelar la distribución espacial de la biomasa aérea se emplearon cuatro variables obtenidas de la imagen satelital: tipos de cobertura vegetal y tres índices de vegetaciones generadas a partir de imágenes multiespectrales del sensor Sentinel 2. Se calculó el Índice Normalizado Diferencial de Vegetación/NDVI, Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde/GNDVI y el Índice de clorofila de borde rojo invertido/IRECI.

Previamente, fue necesario transformar los números digitales (ND) de cada escena en valores de reflectancia superficial, procedimiento realizado mediante el software SNAP.

Para desarrollar este modelo se empleó el modelo de Máxima Entropía (MaxEnt), mismo que para que pueda ejecutarse correctamente, es necesario que previamente todas las variables ambientales y puntos de muestreo, se encuentren en coordenadas geográficas, tengan el mismo límite geográfico y resolución espacial (mismo tamaño de celda), mismas que deben coincidir perfectamente entre sí. Este formato se generó mediante el software ArcGis de ESRI, y adicionalmente, dentro de la plataforma del algoritmo, se definió como categóricas a las variables de cobertura vegetal y el resto se definieron como variables continuas.

### **Análisis datos.**

El análisis de los datos obtenidos mediante la imagen satelital es posible debido a que los factores como las diferentes formaciones vegetales, altitud, índices de vegetación, entre otros, tienen una fuerte correlación con la densidad de la vegetación en el área determinada (Houghton et al. 2009). Esta correlación permite estimar la biomasa utilizando las variables obtenidas de la imagen satelital. Para el estudio se seleccionó el algoritmo de Máxima Entropía (MaxEnt) como un método no paramétrico para modelar y estimar la distribución espacial de la biomasa sobre el suelo.

Al aplicar el algoritmo MaxEnt se obtuvieron como resultado 4 mapas continuos que indican la probabilidad de distribución de biomasa para cada clase. Cada uno de estos mapas presenta valores de 0 a 1, donde los pixeles con valores de 0 indican el lugar menos adecuado para la clase de biomasa y los pixeles con 1 indican la ubicación más adecuada.

Para generar el mapa final de distribución espacial de biomasa aérea, se combinó todos los mapas de probabilidad continua generados por MaxEnt, utilizando la Ecuación 4,

misma que permite seleccionar el valor de biomasa asociado con probabilidad máxima promedio ponderada para cada píxel.

Ecuación 4 (según Benítez, 2015):

$$\hat{B} = \frac{\sum_{i=1}^N P_i^k B_i}{\sum_{i=1}^N P_i^k}$$

Donde,  $P_i$  es la probabilidad estimada de MaxEnt para cada clase de biomasa (valor de rango promedio) y  $\hat{B}$  es el valor estimado de biomasa aérea para cada píxel. El valor de  $k$  indica el poder de probabilidad para este estudio, y para el mismo se eligió el valor  $k = 3$  (tercer momento centrado en la media utilizada para preservar la asimetría de la distribución) obtenido de la literatura (Saatchi et al., 2011).

Los valores de la biomasa aérea obtenidos mediante modelamiento geodésico fueron verificados utilizando los datos calculados en cada unidad de muestreo y obtenidos a partir del diámetro registrado para cada individuo. Además, los valores de biomasa obtenidos fueron multiplicados por el área para obtener la biomasa por hectárea y por tipo de cobertura. Finalmente, los valores de biomasa total fueron multiplicados por el coeficiente universal de transformación de carbono (Ecuación 3) para obtener la cantidad de carbono almacenado por tipo de cobertura vegetal.

### **Objetivo 3**

Para responder al último objetivo, después de obtener los resultados totales de biomasa aérea y stock de carbono, se compararon los valores obtenidos a partir del área total del remante de Bosque de Valle Seco Interandino en Ecuador con respecto a bosques similares localizados en Sudamérica, mediante una exhaustiva revisión bibliográfica. Este tipo de bosque es poco conocidos en su ecología, por lo que no existen muchos estudios

relacionados a la cuantificación de carbono almacenando. Sin embargo, se pudo contrastar este estudio con estudios similares en Perú.

## RESULTADOS

Dentro de cada unidad de muestreo para cada zona identificada en el área de estudio se pudo registrar la cobertura, diámetro y altura de todos los individuos que cumplieron los estándares. La cobertura fue medida para los individuos, dentro de cada transecto, que presentaron más de 1,30 m de alto, aunque no poseían un tallo de 2 cm de DAP o en la base. En la siguiente tabla se presentan los valores de biomasa por unidad de muestreo, obtenidos al aplicar la Ecuación 1, en la cual se utiliza la sumatoria de los porcentajes de cobertura de todos los individuos registrados.

**Tabla 1.** Valores totales de biomasa en toneladas, a partir de los datos de cobertura aplicando la Ecuación 1, para las 20 unidades de muestreo establecidas en la Meseta de Caraburo.

Código	Tipo de Vegetación	% coberturas sobre 100	LN cob	$1,086 \times LN$	$- 3,96 + LN$	Toneladas (t)
T1	Zona de conservación	98,9	4,59	4,99	1,03	2,80
T2	Zona de conservación	100	4,61	5,00	1,04	2,83
T3	Zona de conservación	100	4,61	5,00	1,04	2,83
T4	Zona de conservación	100	4,61	5,00	1,04	2,83
T5	Zona de conservación	76,3	4,33	4,71	0,75	2,11
T6	Área de reforestación nueva	62,7	4,14	4,49	0,53	1,71
T7	Área de reforestación nueva	64,4	4,17	4,52	0,56	1,76
T8	Área de reforestación nueva	74,1	4,31	4,68	0,72	2,05
T9	Área de reforestación nueva	100	4,61	5,00	1,04	2,83
T10	Área de reforestación nueva	100	4,61	5,00	1,04	2,83
T11	Área de reforestación antigua	100	4,63	5,03	1,07	2,90
T12	Área de reforestación antigua	72,9	4,29	4,66	0,70	2,01
T13	Área de reforestación antigua	100	4,61	5,00	1,04	2,83
T14	Área de reforestación antigua	100	4,61	5,00	1,04	2,83
T15	Área de reforestación antigua	100	4,61	5,00	1,04	2,83
T16	Zona de restauración natural	100	4,61	5,00	1,04	2,83
T17	Zona de restauración natural	100	4,61	5,00	1,04	2,83
T18	Zona de restauración natural	100	4,61	5,00	1,04	2,83
T19	Zona de restauración natural	89,9	4,50	4,89	0,93	2,52

T20	Zona de restauración natural	100	4,61	5,00	1,04	2,83
-----	------------------------------	-----	------	------	------	------

Los valores totales de biomasa fueron posteriormente promediados para obtener datos por tipo de cobertura vegetal detallados en la Tabla 2. Esta tabla resume los valores en toneladas por hectárea de biomasa para los cuatro tipos de cobertura establecidos inicialmente (Zona de conservación, Área de reforestación nueva, Área de reforestación antigua y Zona de restauración natural).

**Tabla 2.** Promedio de biomasa por tipo de cobertura vegetal, calculada a partir de los datos de porcentajes de cobertura obtenidos de los arbustos registrados dentro de cada transecto establecido en el área de estudio.

	<b>Biomasa por cobertura (t)</b>
Zona de conservación	2,68
Área de reforestación nueva	2,23
Área de reforestación antigua	2,68
Zona de restauración natural	2,77

Dentro del resultado de la Tabla 2 se puede resaltar que la determinada “Zona de restauración natural” presenta el mayor promedio de cobertura arbustiva en relación a los otros tipos de vegetación estudiados, con 2,77 tn de biomasa. Sin embargo, el “Área de reforestación antigua” y la “Zona de conservación” también presentan valores altos de cobertura arbustiva con 2,68 tn. Esto indica que los valores altos de cobertura arbustiva se verán reflejados en valores altos de biomasa para las zonas mencionadas. Aunque estos valores pueden variar cuando se suman a los totales de biomasa obtenidos mediante los diámetros de los individuos. Por otro lado, la determinada como “Área de reforestación nueva” presento el valor más bajo de cobertura arbustiva con 2,23 tn.

La siguiente tabla, registra los valores de biomasa obtenidos mediante la suma de esta variable derivada de los diámetros (2 o más cm de DAP o en la base) de cada individuo registrado dentro de las unidades de muestreo.

**Tabla 3.** Valores totales de biomasa, a partir de los datos de DAP o diámetro en la base, por transecto, por hectárea en kilogramos y en toneladas, aplicando la Ecuación 2; para las 20 unidades de muestreo establecidas en la Meseta de Caraburo.

Código	Tipo de Vegetación	Suma de individuos en el Transecto (kg/100m <sup>2</sup> )	Biomasa (kg/ha)	Biomasa (t/ha)
T1	Zona de conservación	1233,40	123340,17	123,34
T2	Zona de conservación	700,35	70034,73	70,03
T3	Zona de conservación	569,36	56935,60	56,94
T4	Zona de conservación	797,51	79750,77	79,75
T5	Zona de conservación	94,77	9477,09	9,48
T6	Área de reforestación nueva	348,91	34891,23	34,89
T7	Área de reforestación nueva	200,95	20094,78	20,09
T8	Área de reforestación nueva	1192,00	119200,19	119,20
T9	Área de reforestación nueva	378,00	37799,79	37,80
T10	Área de reforestación nueva	71,57	7156,55	7,16
T11	Área de reforestación antigua	359,99	35998,91	36,00
T12	Área de reforestación antigua	166,29	16628,76	16,63
T13	Área de reforestación antigua	235,50	23549,57	23,55
T14	Área de reforestación antigua	36,67	3667,01	3,67
T15	Área de reforestación antigua	2362,46	236246,45	236,25
T16	Zona de restauración natural	646,85	64684,97	64,68
T17	Zona de restauración natural	696,51	69650,69	69,65
T18	Zona de restauración natural	148,32	14832,29	14,83
T19	Zona de restauración natural	937,79	93779,45	93,78
T20	Zona de restauración natural	1025,77	102577,06	102,58

En la presente tabla se observan los valores de biomasa en toneladas para cada uno de los 20 transectos, obtenidos a partir de los individuos registrados en las unidades de muestreo con una medida mayor o igual a 2 cm de DAP o diámetro en la base. Estos valores fueron posteriormente promediados para obtener el promedio de biomasa por tipo de cobertura vegetal. Los resultados obtenidos mediante el diámetro son más precisos que los obtenidos a partir de la cobertura arbustiva, por lo cual fueron utilizados para realizar los



análisis paralelos de esta investigación (análisis de cálculo de la biomasa aérea derivado de la imagen satelital).

**Tabla 4.** Promedio de biomasa por tipo de cobertura, calculada a partir del DAP o diámetro en la base, obtenido de los árboles y arbustos registrados en cada transecto establecido dentro del área de estudio.

	<b>Biomasa por diámetros (t)</b>
Zona de conservación	67,91
Área de reforestación nueva	43,83
Area de reforestación antigua	63,22
Zona de restauración natural	69,10

En la Tabla 4 se observa que, para los diferentes tipos de cobertura establecidos la zona denominada como “Zona de restauración natural” presenta la mayor cantidad de biomasa con 69,10 tn, las denominadas “Área de reforestación antigua” y “Zona de conservación” también presentan un valor alto de biomasa en promedio para el área de estudio, con 69,10 y 67,91 tn respectivamente. La “Zona de restauración nueva” es el tipo de cobertura que presenta el promedio más bajo de biomasa para las cuatro áreas estudiadas, con 43,83 tn. Sin embargo, los valores de biomasa por diámetros deben sumarse a los promedios de biomasa obtenidos a partir de la cobertura arbustiva para obtener un valor de biomasa más real por tipo de unidad florística (cálculo representado en la Tabla 6, columna *d*).

**Tabla 5.** Valores totales de biomasa por hectárea, obtenidos del análisis de la imagen Satelital Sentinel 2 para los 4 tipos de cobertura vegetal identificados en la Meseta de Caraburo.

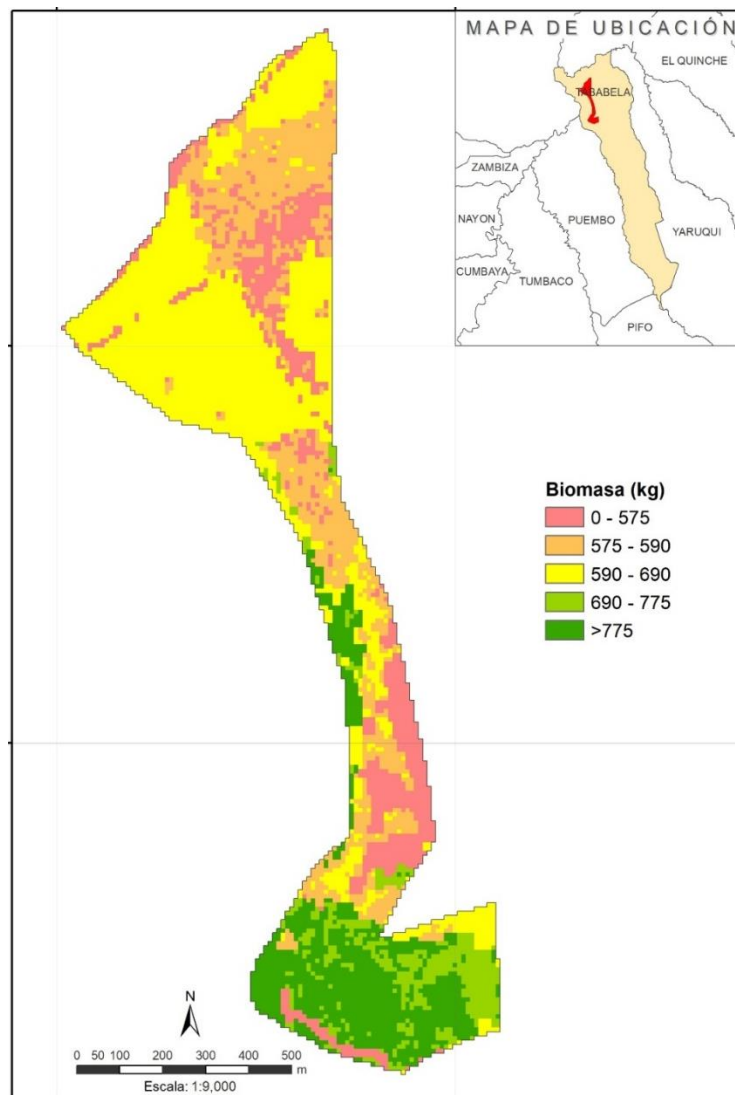
	<b>Biomasa estimada por imagen satelital (t/ha)</b>
Zona de conservación	77,62
Área de reforestación nueva	30,06

Área de reforestación antigua	58,06
Zona de restauración natural	68,11

---

La correlación de las variables obtenidas de la imagen satelital permitió estimar la biomasa total por hectárea para cada tipo de cobertura identificado en el remanente de estudio, la denominada “Zona de conservación” presentó el valor más alto de biomasa con 77,62 tn, la zona denominada como “Zona de restauración natural” también registro un valor alto de biomasa con 68,11 tn y el “Área de restauración antigua” presentó un valor de 58,06 tn. Por otra parte, del total de área estudiadas el “Área de reforestación nueva” registro el valor más bajo de biomasa con 30,06 tn,

La Figura 2 indica la distribución espacial y la biomasa aérea de la meseta de Caraburo, en la cual se puede observar diferentes cantidades de biomasa para los cuatro tipos de cobertura identificados.



**Figura 2.** Mapa que presenta la biomasa (en kg) distribuida en el área de estudio obtenido en base a los análisis utilizando la imagen Sentinel 2.

En la presente imagen espectral el color rojo se encuentra asociado al suelo desnudo del bosque, es decir, que no presenta un tipo de cobertura dominante por lo que la biomasa es muy escasa, de hasta 575 kg. Por otro lado, el color anaranjado es un indicador de valores bajos de entre 575 a 590 kg de biomasa, representa principalmente a la denominada “Área de reforestación nueva”. El color amarillo figura a la “Zona de restauración natural” la cual se encuentra sobre todo en la región norte del remanente, presentando un rango de entre 590 a 690 kg de biomasa. El color verde oscuro y verde

claro indican la presencia de una abundante cobertura vegetal, representando principalmente a las áreas denominadas como “Zona de conservación” y “Área de reforestación antigua”, el verde claro abarca al tipo de cobertura que almacena de 690 a 775 kg de biomasa y el verde oscuro representa al tipo de cobertura con un valor superior a los 775 kg de biomasa almacenado. Adicionalmente, la distribución espacial y la estimación de biomasa sobre el suelo fueron ajustadas en base a los datos obtenidos en campo como puntos control, para obtener datos más cercanos a los reales.

A continuación, la Tabla 6 resume los resultados más relevantes obtenidos de este estudio y presenta la comparación entre los tipos de cobertura y las dos metodologías utilizadas en la medición de biomasa y carbono para las 73.06 hectáreas de la Meseta de Caraburo.

**Tabla 6.** Valor total de biomasa aérea y stock de carbono por tipo de cobertura vegetal obtenido por ambas metodologías establecidas para el estudio en la Meseta de Caraburo.

	<i>Datos de transectos (en campo)</i>					<i>Imagen satelital</i>			
	<b>a.Área (ha)</b>	<b>b.Promedios Biomasa diámetros (t)</b>	<b>c.Promedios Biomasa cobertura (t)</b>	<b>d.Summa de promedios de Biomasa por ha (t)</b>	<b>f.Biomasa Total (t)</b>	<b>g.Carbono Total (t)</b>	<b>h.Biomasa por ha (t)</b>	<b>i.Biomasa Total (t)</b>	<b>j.Carbono Total (t)</b>
Zona de conservación	17,63	67,91	2,68	70,59	1244,49	622,24	77,62	1368,40	684,20
Área de reforestación nueva	4,47	43,83	2,23	46,06	205,90	102,95	30,06	134,35	67,18
Area de reforestación antigua	23,62	63,22	2,68	65,90	1556,58	778,29	58,06	1371,48	685,74
Zona de restauración natural	25,18	69,10	2,77	71,88	1809,83	904,92	68,11	1714,95	857,47
Suelo	2,16								
<b>TOTAL</b>	<b>73,06</b>					<b>2408,40</b>		<b>2294,59</b>	

Dentro de los resultados de biomasa aérea obtenidos mediante los datos colectados en campo (transectos), la cantidad de biomasa obtenida por los datos de cobertura en la columna *c* y los datos de diámetro en la columna *b*, se suman para obtener el valor de biomasa total indicada en la columna *d*. Sin embargo, para obtener un valor de biomasa por hectárea, indicada en la columna *f*, es necesario multiplicar el área de cada tipo de cobertura (columna *a*) por la biomasa total de cada tipo de cobertura (columna *d*). Al

considerar el área se observa que la “Zona de restauración natural” y el “Área de reforestación antigua” son las que presenta los valores más altos en cuanto a biomasa y consecuentemente de stock de carbono, comparando los cuatro tipos de cobertura identificados. Tanto la biomasa como el carbono total fueron significativamente superiores para la determinada “Zona de restauración natural, con 1809,83 y 904,92 tn respectivamente, este valor se pudo ver influenciado debido al área que ocupa dentro del área total de estudio. Aun así, estos valores también se encontraron cercanos a los registrados para la “Zona de restauración antigua”, con 1556,50 tn de biomasa y 778,29 tn carbono, lo cual demuestra la importancia de los procesos de reforestación y manejo en la Meseta. A pesar de que la “Zona de conservación” presenta un área significativamente inferior a las mencionadas, registra un valor bastante alto de biomasa con 1244,49 tn y 622,24 tn de carbono, este resultado refleja la importancia de la designación de un área como protegida. Por otro lado, el “Área de reforestación nueva” presento los valores más bajos de biomasa y carbono con 205,90 y 102,95 tn, respectivamente.

Paralelamente, tomando en cuenta los resultados obtenidos de la imagen satelital Sentinel 2 se observa que los valores totales de biomasa aérea y stock de carbono entre metodologías, si presentan una diferencia de resultados. En este caso la “Zona de restauración natural” se mantiene como el área con mayor cantidad de biomasa y carbono almacenado con 1714,95 y 857,47 tn, respectivamente, existiendo una diferencia de aproximadamente 47 tn de carbono total entre metodologías. Las áreas denominadas como “Área de reforestación antigua” y “Zona de conservación” presentan valores totales muy cercanos entre sí de biomasa y carbono, con 1371,48 y 685,74 tn para la primera zona y con 1368,40 y 684,20 tn para la segunda zona mencionada, sin embargo, la “Zona de reforestación antigua” presenta un área mucho mayor que el área comparada. El “Área

de reforestación antigua” presenta una diferencia de aproximadamente 92 tn de carbono entre la metodología de imagen satelital y los transectos. Por otra parte la “Zona de conservación” presenta una diferencia de aproximadamente 62 tn de carbono total entre metodologías. El área con la menor cantidad de biomasa y carbono almacenado nuevamente corresponde al “Área de reforestación nueva” con 134,35 y 67,18 tn, respectivamente, en comparación a la metodología de transectos existe una diferencia de aproximadamente 35 tn de carbono total.

Sin embargo, al analizar el valor total de carbono obtenido por ambas metodologías se observa que mediante la metodología de levantamiento en campo (transecto) para las 73,06 hectáreas del área de estudio se registró un valor de 2408,40 toneladas y la metodología mediante el uso de la imagen satelital Sentinel 2 presentó un valor de 2294,59 toneladas, existiendo aproximadamente una diferencia de 104 toneladas de carbono total entre metodologías. Ambas metodologías utilizadas no presentan valores relativamente distintos en valores totales de carbono, es decir, cuando no se realizó un análisis detallado por tipo de cobertura.

Adicionalmente, en este estudio se realizó colecciones de muestras para las diferentes especies registradas en cada unidad de muestreo para su posterior identificación. En la Tabla 7 se resume el peso total de cada especie registrada e identificada en todas las unidades de muestreo.

**Tabla 7.** Peso total de las especies registradas en los 20 transectos establecidos en el área de estudio (Meseta de Caraburo).

<b>Especie</b>	<b>Suma de Peso (kg)</b>
<i>Acacia macracantha</i>	10138,04
<i>Aloysia scorodonioides</i>	11,74
<i>Baccharis latifolia</i>	19,24
<i>Buddleja bullata</i>	23,26

<i>Capsicum rhomboideum</i>	21,59
<i>Croton elegans</i>	116,81
<i>Dalea coerulea</i>	6,27
<i>Dodonaea viscosa</i>	826,56
<i>Eucalyptus globulus</i>	115,64
<i>Lantana armata</i>	32,48
<i>Lantana camara</i>	206,73
<i>Lantana sp</i>	104,55
<i>Lantana sp3</i>	27,91
<i>Lantana sp2</i>	5,59
<i>Lycianthes lycioides</i>	15,57
<i>Nicotiana glauca</i>	100,86
<i>Opuntia soederstromiana</i>	346,45
<i>Tecoma stans</i>	25,40

---

Dentro de las especies registradas se encontró que *Acacia macrantha* es una especie muy común dentro del área de estudio y además se caracteriza por acumular gran cantidad de biomasa por individuo, para esta especie se registró una acumulación total de 10.138,04 kg de biomasa. De la lista de especies se puede enfatizar que las especies *Dodonaea viscosa* y *Croton elegans* son arbustos que acumulan una importante cantidad de biomasa, además, son consideradas especies nativas que pueden ser utilizadas en procesos de restauración en el tipo de bosque seco interandino. Por otro lado, especies como *Eucalyptus globulus* y *Lantana cámara* que a pesar de presentar registros altos de biomasa son consideradas especies invasoras que pueden afectar de forma negativa el desarrollo ecológico de estos bosques.

Los bosques secos tropicales se caracterizan por presentar una estación seca prolongada durante el año. No obstante, la estación seca de estos ecosistemas es ventajoso para las actividades antropogénicas, provocando la acelerada pérdida y fragmentación de estos bosques a gran escala (Wilson & Peter, 1988). Actualmente los bosques secos más biodiversos de América son el bosque Cuiquitano de Bolivia y la selva la Cadona del sur de México. Entre los principales bosques secos de América del Sur se encuentran: el

bosque seco ecuatorial y el de Tumbes-Piura, en el noroeste de la costa de Perú, que debido a su aislamiento presentan gran cantidad de especies endémicas, al igual que los bosques secos de África sudoriental, como el bosque seco de Madagascar y Nueva Caledonia. (Murphy, et al, 1995).

Dentro de Sudamérica se han realizado pocos estudios similares al presente, como es el caso de la región de San Martín en Perú, en el cual se cuantificó el stock de carbono de diferentes sistemas. Dentro de este estudio, uno de los sistemas analizado fue el de bosque secundario, ubicado en el área de Conservación Ojos de Agua. El área de estudio corresponde a un bosque seco estacional, dentro del cual, se analizó una hectárea mediante la metodología de transectos, midiendo el DAP y altura de los individuos registrados. Mediante la aplicación de ecuaciones alométricas se obtuvo un valor de biomasa aérea de 275,73 tn/ha para este bosque (Díaz et al., 2016). El valor de carbono total se obtuvo al considerar la biomasa muerta y el carbono orgánico del suelo, por lo que al aplicar el coeficiente de transformación de carbono (Ecuación 3) se estima que el carbono total obtenido de la biomasa aérea de este bosque sería de aproximadamente 137 tn, este resultado puede contrastarse con la biomasa y carbono encontrados para la denominada “Zona de Conservación”, al ser el área mejor conservada dentro de este estudio.

## **DISCUSION**

Se han establecido, medido y georreferenciado 20 transectos como unidades de muestreo para analizar el stock de carbono y la dinámica del bosque en la Meseta de Caraburo. Dentro de cada transecto se midió la altura, cobertura, diámetro y se identificó a todos los individuos registrados en los mismos, para el posterior cálculo de biomasa por transecto y por tipo de cobertura, y de esta forma al valor obtenido aplicar el factor universal de



transformación de carbono para obtener el valor total de carbono almacenado por tipo de cobertura vegetal y comparar con los valores obtenidos mediante la imagen satelital Sentinel 2.

### **Objetivo 1.**

Los arbustos son considerados un pequeño componente del presupuesto total de carbono, con cerca del 2% del carbono total en un área forestal (Heath et al., 2003), no pueden secuestrar mucho carbono, pero son importantes para aumentar la reserva de carbono en el suelo. La Meseta de Carbauro en la cual se desarrolló este estudio es considerada como un Bosque de Valle Seco Interandino, el cual presenta en su mayoría un tipo de vegetación arbustiva, por lo que se justifica el monitoreo del mismo (Chojnaky y Milton, 2010). Para considerar dentro del cálculo a este tipo de vegetación se midió la cobertura de los individuos con altura igual o superior a 1,30 cm, aun cuando no presentaron un DAP o diámetro en la base de más de 2 cm. En la Tabla 1 se detallan los valores de la biomasa total para cada uno de los 20 transectos establecidos, estos valores se obtuvieron al aplicar la Ecuación 1, la cual fue estandarizada para utilizar el porcentaje de cobertura de todos los individuos arbustivos en la estimación de la biomasa dentro de cada transecto. Por lo tanto, es importante usar las ecuaciones de biomasa apropiadas, ya que al obtener una relación de biomasa a partir de la cobertura puede existir una amplia variación dependiendo de la altura y la ramificación patrón de las especies arbustivas (Chojnaky y Milton, 2010).

A partir de los valores totales de biomasa de cada transecto se obtuvo el promedio para cada tipo de cobertura vegetal. En la Tabla 2 se resume el promedio de la biomasa total obtenida mediante el porcentaje de la cobertura de la vegetación arbustiva dentro de cada zona. La denominada “Zona de restauración natural” presentó el mayor promedio de

cobertura arbustiva de todas las áreas muestreadas, este resultado es esperado considerando que es el área que presenta la mayor extensión del total de área de estudio. Por otro lado, las áreas determinadas como “Zona de conservación” y “Área de reforestación antigua” también presentan un almacenamiento alto de biomasa, pero hay que considerar que la “Zona de conservación” presenta una extensión mucho más reducida; El valor alto de biomasa en esta área es justificada al ser manejada como una zona protegida, lo cual permitir mantener la vegetación nativa y una cobertura abundante. Finalmente, el “Área de reforestación nueva” presenta el valor más bajo de biomasa almacenada. Sin embargo, el valor total de biomasa varía al sumarle los valores totales de la biomasa obtenida por los datos de diámetros de los individuos con una DAP o diámetro basal superior a 2 cm, reflejados en la Tabla 3.

Los datos de biomasa obtenidos a partir de los diámetros de los individuos registrados dentro de cada transecto se obtuvieron al aplicar la Ecuación 2, también conocida como un estimador matemático significativo para las especies características de bosques secos altoandinos, o que presentan periodos definidos de lluvia y ausencia de esta. Las ecuaciones alométricas aplicadas para un grupo de especies dentro de un ecosistema pueden no representar la máxima exactitud para estimar la biomasa (Segura & Kanninen, 2005). Sin embargo, se consideró esta ecuación, ya que incluye la especie *Dodonaea viscosa*, la más abundante dentro del área de estudio y característica del Bosque de Valle Seco Interandino. Dentro de la Ecuación 2 el valor de DAP está dado por el promedio de los diámetros de todos los individuos registrados dentro de cada transecto, permitiendo obtener a partir de esta propiedad alométrica un valor de biomasa. En la Tabla 4 se encuentran resumidos los resultados del promedio de biomasa para cada tipo de cobertura vegetal. De igual forma, la dominada “Zona de restauración natural” presentó el valor más alto de biomasa, seguido de la “Zona de conservación”, el “Área de reforestación

antigua”, y con el valor más bajo de biomasa se encuentra el “Área de reforestación nueva”. Los resultados en base a la relación de la cantidad de biomasa con el tipo de cobertura son similares a los obtenidos mediante los datos de porcentajes de cobertura. No obstante, la estimación de biomasa aérea a partir de los diámetros de cada individuo registrado es el método más preciso, por lo que estos datos son más precisos que los obtenidos de la cobertura de la vegetación arbustiva (Basuki et al., 2009).

El valor de biomasa total se obtuvo al realizar la suma de los valores de biomasa obtenidos mediante los datos de porcentajes de cobertura y diámetros, y estos multiplicarlos por el área de cada tipo de cobertura identificada dentro de área de estudio. Considerando el área se justifica a la “Zona de Restauración natural” como el área con mayor cantidad de biomasa, al ser el tipo de cobertura vegetal con mayor extensión del total de las cuatro áreas estudiadas, con 25,28 ha. Por otro lado, el “Área de reforestación antigua” también se justifica como el área con menor cantidad de biomasa al comprender una extensión bastante reducida de apenas 4,47 ha, además, es un área que recientemente ha implementado planes de reforestación, abarcando la vegetación más reciente que se caracteriza por presentar una gran dispersión en el terreno con individuos de pequeños diámetros.

## **Objetivo 2.**

Todos los datos obtenidos mediante levantamiento en campo (transectos) fueron utilizados como control para ajustar los datos obtenidos mediante la imagen Satelital Sentinel 2, permitiendo obtener un mapa que presenta la biomasa en kg del total del área de estudio indicado en la Figura 2. El mismo mapa representa, mediante el uso base de una imagen espectral, la cantidad de biomasa encontrada en los diferentes tipos de cobertura identificados, en una escala de colores de rojo a verde. La estimación de

biomasa sin considerar el área, señalo al “Zona de conservación” y al “Zona de restauración natural” como las zonas con mayor cantidad de biomasa, con valores superiores a los 775 kg de biomasa por hectárea y al “Área de reforestación nueva” como la zona con la menor cantidad de biomasa almacenada de menos de 590 kg de biomasa por hectárea. Sin embargo, al considerar el área de cada uno de los tipos de cobertura identificados en la zona se rectificó los resultados de biomasa total. En concordancia con los datos obtenidos mediante levantamiento en campo, la biomasa total obtenida de la imagen satelital señalo a la “Zona de restauración natural” como el área con mayor cantidad de biomasa almacenada y al “Área de reforestación antigua” como la zona con menor cantidad de biomasa. Ambas metodologías presentan resultados similares si se considera la relación de la cantidad de biomasa con el tipo de cobertura, pero si se consideran los resultados paralelamente si existen diferencias de valores de hasta aproximadamente 185 tn de biomasa entre metodologías.

Para obtener el valor total de carbono almacenado fue necesario aplicar el coeficiente universal de transformación de carbono al valor total de biomasa obtenido por ambas metodologías. El valor de biomasa se encuentra directamente relacionado con la cantidad de carbono, por lo tanto, los valores altos de biomasa obtenidos concluirán en valores altos de carbono almacenado. Dentro de la metodología de levantamiento en campo la “Zona de restauración natural” presenta el valor más alto de biomasa almacenada dentro de las áreas estudiadas, y también se destacó como el tipo de cobertura con mayor almacenamiento de carbono, por otro lado, el “Área de reforestación antigua” en relación a la biomasa obtuvo un almacenamiento bajo de carbono. De igual forma, las estimaciones de biomasa realizadas a partir de la imagen satelital deben ser sometidas al coeficiente de transformación de carbono, el cual también señalo a la “Zona de restauración natural” como el área con la mayor cantidad de carbono y la menor cantidad

de carbono obtenida en el “área reforestación antigua”. Al analizarlos paralelamente los resultados entre metodologías, también se presentan diferencias de hasta 92 tn de carbono. En general, los resultados totales de biomasa y carbono almacenado por tipo de cobertura vegetal mediante la metodología de transectos son mayores a los resultados de la imagen satelital, esto seguramente se debe a que en el levantamiento en campo de los transectos a pesar de ser establecidos al azar fueron colocados en lugares con vegetación representativa del tipo de cobertura asignada a la zona, ya que algunas zonas presentaban grandes extensiones de suelo desnudo. Al establecer los transectos en lugares que permitan obtener resultados representativos se pudo haber sobreestimado la cantidad de biomasa y carbono en los diferentes tipos de cobertura vegetal.

Para el total de las 72.06 hectáreas del área de estudio existieron resultados similares de carbono total almacenado, al comparar la metodología de transectos y la metodología de modelamiento geodésico, existió una diferencia de aproximadamente 114 tn de carbono entre metodologías. Puesto que, se utilizó a los datos de levantamiento en campo como puntos control, fue posible ajustar la metodología de la imagen satelital con tan solo 20 transectos (0,1 de hectárea) para obtener un valor bastante cercano al real, es decir, a los datos obtenidos mediante la aplicación de ecuaciones alométricas.

Hay diferentes formas de mejorar la cuantificación de biomasa por este método, como el aumento del tamaño de muestras en campo que permite obtener ecuaciones alométricas más precisas para estimar la biomasa aérea y para validar datos. Este tipo de ecuaciones son las herramientas más utilizadas para realizar la estimación total de biomasa aérea, permitiendo modelar los incrementos o decrementos en el carbono almacenado en los bosques durante periodos de tiempo relativamente cortos (Basuki et al., 2009). Este tipo de modelos deben ser cada vez más utilizados para informar iniciativas como la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (UNFCCC), en la

cual los estados suscritos a ella deben realizar informes periódicos del estado de sus recursos forestales, densidades de biomasa, stock de carbono y los resultados de mecanismo de gestión en reducción de emisiones de la deforestación de países en desarrollo (REDD) (UNFCCC, 2008). A pesar del intento en desarrollar modelos más flexibles, estos pueden no reflejar correctamente la biomasa en un área o proyecto específico (Segura & Kanninen, 2005) lo que también complica cumplir con estas metas. Además, los datos de biomasa obtenidos de mediciones de campo solo existen para algunos lugares de mundo, para los lugares en que estos datos no están disponibles, es importante encontrar un enfoque alternativo para evaluar la dinámica a largo plazo de la biomasa aérea (Massada et al., 2006).

El uso de sensores remotos se presenta como una alternativa eficaz y económica para obtener datos más precisos de biomasa aérea y consecuentemente de stock de carbono. Los datos obtenidos de fuentes de teledetección pueden ayudar en la estimación de la misma. El uso de imágenes satelitales de alta resolución o las fotografías aéreas podrían reemplazar una parte de los datos obtenidos en el levantamiento en campo y los mismos se pueden utilizar como complemento a los datos obtenidos en terreno, ya que la retrodispersión de microondas es bastante sensible a la estructura de la vegetación, y los datos hiperspectrales proveen información sobre la composición de especies arbóreas que forman parte de los bosques objeto de cuantificación (Gasparri et al., 2010).

Inicialmente, dentro de los 20 transectos establecidos se identificó a todas las especies vegetales registradas en cada transecto, mediante la toma de una muestra de cada especie para la posterior identificación en el herbario nacional (QCNE). En la Tabla 7 se encuentran las especies identificadas para todas las unidades de muestreo, y la biomasa en kg por especie. *Acacia macracantha* es una especie arbórea leguminosa que se encuentra distribuida ampliamente en América, restringida principalmente a los bosques

secos tropicales (Vargas & Parra, 2009). Dentro de las unidades de muestreo, *Acacia macracantha* no se consideró como una especie muy común pero debido a su naturaleza arbórea acumula una gran cantidad de biomasa por individuo, obteniendo la mayor acumulación de biomasa dentro de la Meseta.

Por otro lado, *Dononea viscosa* es una especie arbustiva nativa de Ecuador, que se caracteriza por habitar en bosques secos montañosos bajos (Paredes, 2013). Esta especie fue dominante en el área de estudio, a pesar de no acumular una gran cantidad de biomasa por individuo al encontrarse en abundancia obtiene un valor alto de biomasa. *Opuntia soederstromiana* es una especie endémica de Ecuador, pertenece a la familia Cactaceae la cual es característica del clima seco. Aun cuando esta especie de cactus no es tan repetitiva dentro de las unidades de muestreo, al presentar tallos engrosados dados por el desarrollo del parénquima, resulta en un almacenamiento considerable de biomasa (Subía, 2013). La especie *Croton elegans* es un pequeño arbusto perenne de rápido crecimiento, endémica de Ecuador y que habita en zonas secas interandinas (Herrera et al., 2018). Estas especies al considerarse endémicas o nativas de la región pueden ser tomadas en cuenta en actividades de restauración de la zona si el objetivo es acumular biomasa con este tipo de especies.

No obstante, también se registran especies invasivas características de zonas secas como el arbusto *Lantana cámara* (Rzedowski et al., 1996). Esta especie se encuentra ampliamente distribuida en el área de estudio, obteniendo una acumulación alta de biomasa. También se encontraron individuos de la especie arbórea introducida *Eucalyptus globulus*, la cual es considerada como una de las principales especies invasoras, al ser un árbol de gran tamaño aporta con valores altos de biomasa. Estas especies no-nativas a pesar de registrar valores altos de acumulación de biomasa, no son

recomendados en actividades de restauración debido a su gran potencial infestivo y de impacto ecológico.

### **Objetivo 3**

Los bosques secos tropicales donde se incluyen los BVSI, al ser desplazado por las actividades humanas se encuentran también altamente fragmentados en diferentes regiones del mundo. Esto ha desencadenado el interés por realizar nuevos estudios que puedan contribuir con información para establecer planes de conservación en este tipo de bosques. Los resultados de biomasa y carbono del estudio de la región de San Martín en Perú se pueden comparar con los obtenidos dentro de nuestro estudio para la denominada “Zona de conservación”. Al contrastar el valor de biomasa por hectárea, se determinó que el bosque seco de la región de San Martín presenta un valor de aproximadamente 200 toneladas más de biomasa que la reportada en este estudio. Este valor alto de biomasa aérea y por lo tanto de carbono, estaría influenciado por la disposición de la zona de muestreo peruana misma que se encuentra en un área de conservación de cerca de 50 años, con una alta abundancia vegetativa por la presencia de individuos mayores y más robustos. Además, la flora encontrada en mayor abundancia en esta zona del Perú corresponde a las especies Sabina (*Mosannona vasquezii*), Chucchumbo (*Eugenia limbosa*), Uchumullaca (*Trichilla japurensis*) y Quinilla (*Manilkara bidentata*), las cuales registran valores de DAP de hasta 68,75 cm y alturas de hasta 25,62 m, por lo tanto, estos individuos acumulan gran cantidad de biomasa y carbono (Díaz et al., 2016). Por el contrario, la “Zona de conservación” de este estudio registra en su mayoría pequeños arbustos de la especie *Dodonaea viscosa* y *Acacia macracantha*, individuos con un valor promedio de 4,15 cm de DAP y una altura de 1,94 m, valores bastante inferiores a los registrados en el bosque de Perú.



## CONCLUSIONES

Para realizar una estimación de la biomasa aérea mediante la recopilación de datos en campo se establecieron 20 transectos distribuidos en cuatro tipos diferentes de cobertura y cronología denominados como: Zona de conservación, Área de reforestación antigua, Área de reforestación nueva y Zona de restauración natural, nombradas así por el tipo de uso impartido por la entidad que maneja el remanente en estudio. Puesto que el Bosque de Valle Seco Internadino se caracteriza por presentar en su mayoría vegetación arbustiva se utilizaron mediciones de DAP y porcentaje de cobertura para considerar a este tipo de vegetación tan característica. La estandarización de ecuaciones alométricas ya existentes para especies de bosque seco permitió obtener una estimación razonable de la biomasa y el stock de carbono en un tipo de bosque con dominancia de vegetación arbustiva al combinar las mediciones de cobertura y diámetro. Esta metodología determinó a la denominada “Zona de restauración natural” como la zona con la mayor cantidad de biomasa y carbono almacenado en relación a los otros tipos de cobertura, debido a la gran extensión del total del área de estudio, la implementación de acciones de conservación y a la capacidad de resiliencia del ecosistema.

Dentro del presente estudio se comprobó que las herramientas de sistemas de información geográfica como las imágenes satelitales, también se presentan como una confiable alternativa para estudios rápidos de captura de carbono, que necesitan datos de biomasa y stock de carbono. A pesar de que las mediciones por diámetro son las que ofrecen datos más sólidos también requieren un mayor tiempo de trabajo de campo y hacen falta ecuaciones de biomasa para muchas especies.

La necesidad de estimar con precisión el stock de carbono será cada vez más importante a medida que el uso de la tierra y el cambio climático global alteren cada vez más los

bosques y los ecosistemas no forestales. Estos cambios van a tener implicaciones graves para la vida silvestre, la biodiversidad, ciclo de nutrientes, incendios y otros problemas de manejo donde estudios de captura de carbono puede convertirse en el objetivo clave, siendo así importante realizar este tipo de estudios que detallen la cantidad de biomasa y carbono que captan nuestros bosques.

Finalmente, realizar este tipo de estudios permite aportar a la compilación de información base para realizar comparaciones regionales e implementar futuros planes de manejo sostenibles y conservación de ecosistemas bajo riesgo crítico como son los Bosques de Valle Seco Interandino, mismos que a causa del ser humano han sufrido impactos muy negativos que amenazan a la diversidad única que registran.

### REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Aguirre, Z. (2012). Especies forestales de los bosques secos del Ecuador. *Guía dendrológica para su identificación y caracterización. Proyecto Manejo Forestal Sostenible ante el Cambio Climático. MAE/FAO–Finlandia. Quito, Ecuador.*
- Aguirre, Z., Kvist, L., Sánchez, O., Editores, M., Moraes, R., Øllgaard, B., Borchsenius, F & Balslev, H. (2006). Bosques secos en Ecuador y su diversidad. *Botánica Económica de los Andes Centrales. pp.:162- 187, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia.*
- Álvarez, C.G. (2008). *Modelos alométricos para la estimación de biomasa aérea de dos especies nativas en plantaciones forestales del trópico de Cochabamba, Bolivia.*
- Recuperado de  
<http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr:80/handle/11554/4357>

- Albuja, V. L. (2011). *Biodiversidad de los Valles Secos Interandinos del Ecuador. Mamíferos*. Recuperado de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/6736>
- Basuki, T. M., van Laake, P. E., Skidmore, A. K., & Hussin, Y. A. (2009). Allometric equations for estimating the above-ground biomass in tropical lowland Dipterocarp forests. *Forest Ecology and Management*, 257(8), 1684-1694. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.01.027>
- Benítez L. (2015). Modelagem de biomassa acima do solo e emissões de carbono associadas a mudanças na cobertura da terra na floresta tropical amazônica equatoriana. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. São José dos Campos - SP - Brasil
- Chojnacky, D. C. & M. Milton. 2010. Measuring carbon in shrubs. In: Field Measurements for Forest Carbon Monitoring: A Landscape-Scale Approach. Hoover CM (Ed.). Springer, NY, USA.
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B. C., ... Vieilledent, G. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, 20(10), 3177-3190. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>
- Clark, D. A., Brown, S., Kicklighter, D. W., Chambers, J. Q., Thomlinson, J. R., Ni, J., & Holland, E. A. (2001). Net Primary Production in Tropical Forests: An Evaluation and Synthesis of Existing Field Data. *Ecological Applications*, 11(2), 371-384. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2001\)011\[0371:NPPITF\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2001)011[0371:NPPITF]2.0.CO;2)
- Díaz, P., Ruiz, G., Tello, C., & Arévalo, L (2016). Carbono almacenado en cinco sistemas de uso de tierra, en la región San Martín Perú. *Revista Intenacional de*

Desarrollo Regional Sustentable, 2(1-2), 57–67. Recuperado de  
<http://rinderesu.com/index.php/rinderesu/article/view/22/06>

Gasparri, N. I., Parmuchi, M. G., Bono, J., Karszenbaum, H., & Montenegro, C. L. (2010). Assessing multi-temporal Landsat 7 ETM+ images for estimating above-ground biomass in subtropical dry forests of Argentina. *Journal of Arid Environments*, 74(10), 1262–1270.  
<https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2010.04.007>

Gillespie, T. W., Grijalva, A., & Farris, C. N. (2000). Diversity, composition, and structure of tropical dry forests in Central America. *Plant Ecology*, 147(1), 37-47. <https://doi.org/10.1023/A:1009848525399>

Heath, L. S., Kimble, J. M., Birdsey, R. A., & Lal, R. (2003). The potential of U.S. forest soils to sequester carbon. In: Kimble, J.M.; Heath, Linda S.; Birdsey, Richard A.; Lal, R., eds. *The potential of U.S. forest soils to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect*. Boca Raton: CRC Press: 385-394.  
Recuperado de <https://www.fs.usda.gov/treesearch/pubs/6979>

Herrera, C., Pérez, Y., Morocho, V., Armijos, C., Malagón, O., Brito, B., ... Gilardoni, G. (2018). PRELIMINARY PHYTOCHEMICAL STUDY OF THE ECUADORIAN PLANT CROTON ELEGANS KUNTH (EUPHORBIACEAE). *Journal of the Chilean Chemical Society*, 63(1), 3875-3877. <https://doi.org/10.4067/s0717-97072018000103875>

Houghton, R. A., Hall, F., & Goetz, S. J. (2009). Importance of biomass in the global carbon cycle. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 114(G2).  
<https://doi.org/10.1029/2009JG000935>

IPCC. (2019). Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza Resumen para responsables de políticas Recuperado 18 de diciembre de 2019, de Organización Meteorológica Mundial website: <https://public.wmo.int/es/resources/bulletin/el-ipcc-publica-el-informe-especial-sobre-el-calentamiento-global-de-15-%C2%B0c>

Lee, J.-H., Ko, Y., & McPherson, E. G. (2016). The feasibility of remotely sensed data to estimate urban tree dimensions and biomass. *Urban Forestry & Urban Greening*, *16*, 208-220. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.02.010>

Lewis, S. L. (2006). Tropical forests and the changing earth system. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *361*(1465), 195–210. <https://doi.org/10.1098/rstb.2005.1711>

Lima, R. B. D., Alves Júnior, F. T., Oliveira, C. P. D., Silva, J. a. a. D., Ferreira, R. L. C., Lima, R. B. D., ... Ferreira, R. L. C. (2017). Predicting of biomass in Brazilian tropical dry forest: A statistical evaluation of generic equations. *Anais Da Academia Brasileira de Ciências*, *89*(3), 1815-1828. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201720170047>

Malhi, Y., Phillips, O. L., Cramer, W., Bondeau, A., Schaphoff, S., Lucht, W., ... Sitch, S. (2004). Tropical forests and the global carbon cycle: Impacts of atmospheric carbon dioxide, climate change and rate of deforestation. *Philosophical*

*Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*,  
359(1443), 331-343. <https://doi.org/10.1098/rstb.2003.1428>

- Massada, A. B., Carmel, Y., Tzur, G. E., Grünzweig, J. M., & Yakir, D. (2006).  
Assessment of temporal changes in aboveground forest tree biomass using aerial  
photographs and allometric equations. *Canadian Journal of Forest Research*,  
36(10), 2585-2594. <https://doi.org/10.1139/x06-152>
- Mitchard, E. T. A. (2018). The tropical forest carbon cycle and climate change. *Nature*,  
559(7715), 527-534. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0300-2>
- Murphy, P. & Lugo, A. E. (1995) Dry forests of Central America and the Caribbean.  
Seasonally dry tropical forests (ed. by S. H. Bullock, H. A. Mooney and E.  
Medina), pp. 146–194. Cambridge University Press, Cambridge.
- Nadler, C., Meza, A., Torres, R., Jara, A. (2001). Medición del carbono almacenado en  
los bosques de la reserva nacional Malleco, IX Región, Chile. Simposio  
Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas  
Forestales, Valdivia, Chile, 14 pp
- Paredes, M. (2013). “DETERMINACIÓN DE LA ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE DE  
CUATRO PLANTAS NATIVAS DEL ECUADOR” (Tesis de pregrado).  
Universidad Central del Ecuador. Quito, Ecuador. Recuperado de  
<http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/1901>
- 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, 171–202.  
<https://doi.org/10.17151/luaz.2016.43.9>

- Rojas-García, F., De Jong, B. H., Martínez-Zurimendí, P., & Paz-Pellat, F. (2015). Database of 478 allometric equations to estimate biomass for Mexican trees and forests. *Annals of Forest Science*, 72(6), 835-864.
- Rzedowski, J., G. Calderón de Rzedowski y R. Galván (1996). Flora del Bajío y de Regiones Adyacentes. Fascículo complementario XIV. Nota sobre la vegetación y la flora del noreste del estado de Guanajuato. Instituto de Ecología, Pátzcuaro, Michoacán. 61 p.
- Saatchi, S. S., Harris, N. L., Brown, S., Lefsky, M., Mitchard, E. T. A., Salas, W., Zutta, B. R., Buermann, W., Lewis, S. L., Hagen, S., Petrova, S., White, L., Silman, M., & Morel, A. (2011). Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(24), 9899–9904. <https://doi.org/10.1073/pnas.1019576108>
- Schulte, A., & Schöne, D. H.-F. (1996). *Dipterocarp Forest Ecosystems: Towards Sustainable Management*. World Scientific.
- Segura, M., & Kanninen, M. (2005). Allometric Models for Tree Volume and Total Aboveground Biomass in a Tropical Humid Forest in Costa Rica. *Biotropica*, 37(1), 2-8. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2005.02027.x>
- Sousa, A. M. O., Gonçalves, A. C., Mesquita, P., & Marques da Silva, J. R. (2015). Biomass estimation with high resolution satellite images: A case study of *Quercus rotundifolia*. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 101, 69-79. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.12.004>
- Subía, M. A. (2013). Comparación entonofaunística de tres sitios del Bosque Protector Jerusalén durante estaciones seca y lluviosa. Disertación. *Pontificia*

*Universidad Católica del Ecuador*. Recuperado de

<http://repositorio.puce.edu.ec:80/xmlui/handle/22000/5722>

Troya, A., Bersosa, F., & Espinoza, L. (2016). Insectos de los remanentes de bosques secos Andinos del norte de Ecuador. *Revista Ecosistemas*, 25(2), 79-82-82.

<https://doi.org/10.7818/re.2014.25-2.00>

UNFCCC, United Nations Framework Convention on Climate Change. (2008) Report of the Conference of the Parties on its thirteenth session, held in Bali from 3 to 15 December 2007. Addendum, Part 2. Document FCCC/CP/2007/6/Add.1.

UNFCCC, Bonn, Germany

Vargas, H. A., & Parra, L. E. (2009). Prospección de lepidópteros antófagos asociados a

*Acacia macracantha* Willd. (Fabaceae) en el norte de Chile. *Revista Brasileira de Entomologia*, 53(2), 291-293. [https://doi.org/10.1590/S0085-](https://doi.org/10.1590/S0085-56262009000200012)

[56262009000200012](https://doi.org/10.1590/S0085-56262009000200012)

Walker, L. R., Wardle, D. A., Bardgett, R. D., & Clarkson, B. D. (2010). The use of chronosequences in studies of ecological succession and soil development.

*Journal of Ecology*, 98(4), 725–736. [https://doi.org/10.1111/j.1365-](https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2010.01664.x)

[2745.2010.01664.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2010.01664.x)

Wilson, E. O., & Peter, F. M. (1988). *Tropical Dry Forests The Most Endangered*

*Major Tropical Ecosystem*. National Academies Press (US), editors

Biodiversity. Washington (DC): National Academies Press (US); Chapter 14.

Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK219281/>



Woodall, C. W., Heath, L.S., Domke, G. M., & Nichols, M. C. (2011). *Methods and equations for estimating aboveground volume, biomass, and carbon for trees in the U.S. forest inventory, 2010*. <https://doi.org/10.2737/NRS-GTR-88>

Zachos, J. C., Dickens, G., & Zeebe, R. (2008). An Early Cenozoic perspective on Greenhouse warming and carbon cycle dynamics. *Nature*, *451*, 279-283.  
<https://doi.org/10.1038/nature06588>