



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS



Uso potencial de *Eucalyptus viminalis* Labill. para la captura de carbono en un sistema silvopastoril, Perú

Potential Use of *Eucalyptus viminalis* Labill. for Carbon Capture in a Silvopastoral System, Peru

Fátima Elizabeth Marcelo-Bazán¹ , Walter Mantilla-Chávez¹ , Juan Rodrigo Baselly-Villanueva¹ ,
Juan Carlos Vargas-Aldave² , Ulises Pajares-Gallardo² 

Marcelo-Bazán, F. E., Mantilla-Chávez, W., Baselly-Villanueva, J. R., Vargas-Aldave, J. C., Pajares-Gallardo, U. (2023). Uso potencial de *Eucalyptus viminalis* Labill. para la captura de carbono en un sistema silvopastoril, Perú. *Colombia Forestal*, 26(1), 64-78.

Recepción: 4 de febrero 2022

Aprobación: 27 de septiembre 2022

Resumen

En la actualidad se hace necesario mitigar la concentración de gases con efecto invernadero, y son escasas las investigaciones realizadas en los Andes peruanos sobre captura de carbono en sistemas agroforestales. El objetivo de esta investigación fue determinar el potencial de almacenamiento de carbono de *Eucalyptus viminalis* instalado en un sistema silvopastoril junto con otros depósitos en Cajamarca, Perú. La biomasa forestal aérea fue determinada mediante ajustes de modelos, y la necrosada y herbácea mediante muestreos sistemáticos. El carbono almacenado en la biomasa se determinó con la fracción 0.5, y el almacenado en el suelo se estimó a partir de análisis en laboratorio. El *Eucalyptus viminalis* mostró potencial para capturar carbono en un sistema silvopastoril, debido a su alta capacidad de rebrote, derivada de una elevada densidad poblacional, así como a la efimeridad de sus componentes menores. La especie puede ser un importante reservorio de carbono en un sistema que logra hacer compatibles la producción y conservación.

Palabras clave: análisis destructivo, cambio climático, eucalipto, heladas, silvopasturas.

Abstract

Currently, it is necessary to mitigate the concentration of greenhouse gases, and there is little research on carbon sequestration in agroforestry systems which has been conducted in the Peruvian Andes. The objective of this research was to determine the carbon storage potential of *Eucalyptus viminalis* installed in a silvopastoral system together with other deposits in Cajamarca, Peru. The aerial forest biomass was determined by model adjustments, and the necrotic and herbaceous biomass by systematic sampling. The carbon stored in the biomass was determined with the 0.5 fraction, and the one stored in the soil was estimated via laboratory analysis. *Eucalyptus viminalis* showed potential to capture carbon in a silvopastoral system, due to its high regrowth capacity, which stems from a high population density, and the ephemerality of its minor components. The species can be an important carbon reservoir in a system that manages to make production and conservation compatible.

Keywords: destructive analysis, climate change, eucalyptus, frosts, silvopastures.

1 Estación Experimental Agraria Baños del Inca. Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). Cajamarca, Perú.

2 Asociación Civil para la Investigación y el Desarrollo Forestal. ADEFOR. Cajamarca, Perú.

* Autor de correspondencia.

INTRODUCCIÓN

La revolución industrial y el incremento demográfico exponencial son las principales causas para que el dióxido de carbono (CO₂), el principal gas de efecto invernadero (GEI), haya aumentado de 275 a 414 partes por millón (ppm) desde el periodo preindustrial hasta 2021 (NOAA, 2021). Sin embargo, la máxima concentración que puede soportar nuestro planeta para conservar un ambiente apropiado es de 350 ppm (Hansen et al., 2008). Este excedente de CO₂ viene ocasionando el cambio climático, estimándose un actual calentamiento global antropogénico de 1.0 °C con respecto a los niveles preindustriales (IPCC, 2019; NASA, 2021). La inestabilidad climática tiene repercusiones negativas sobre la agricultura, la seguridad alimentaria y los recursos naturales, principalmente en la población rural (FAO, 2020).

Los Sistemas Agroforestales (SAF) combinan las medidas para la adaptación al cambio climático, la mitigación de emisiones de GEI y el desarrollo sostenible, pues inmovilizan el carbono de la atmósfera para almacenarlo en su biomasa (Riofrío et al., 2013; Fonseca et al., 2021). De igual manera, los sistemas silvopastoriles (SSP) son una alternativa para la captura de carbono que permite a los productores recibir pagos por servicios ambientales y generar ingresos a corto y largo plazo por el pastoreo y la madera (Seeberg, 2010; Díaz et al., 2020). Dependiendo de la especie forestal, la estructura del sistema y los factores edafoclimáticos, se pueden almacenar de 36.72 a 112.56 Mg.C ha⁻¹ (Anguiano et al., 2013; López et al., 2015). Sin embargo, son escasos los registros sobre su potencial de almacenamiento de carbono (Miranda et al., 2007; Riofrío et al., 2013), especialmente en los Andes peruanos, donde existe un vacío de investigación (Oliva et al., 2017).

Las especies del género *Eucalyptus* han sido plantadas en más de 90 países debido a su rápida adaptabilidad, crecimiento y corta rotación (IUFRO, 2018; Ghosh et al., 2020), pero muchas son susceptibles a heladas y ataques de patógenos

como el *Eucalyptus globulus* Labill. (Hunter et al., 2009; Oberschelp et al., 2020). El *Eucalyptus viminalis* Labill. ha sido introducido en diferentes países por su buen crecimiento, por su resistencia a heladas y por responder adecuadamente en SSP (Cappa et al., 2010; Scaramuzzino et al., 2019). En la sierra de Cajamarca, a partir de los años 70, el Centro de Investigación y Capacitación Forestal (CICAFOR) evaluó la introducción de diferentes especies y procedencias de *Eucalyptus* (Carton & Chávez, 2018), determinando que *E. viminalis* presentó buen prendimiento y crecimiento en áreas donde *E. globulus* era afectada por las bajas temperaturas (INFOR & FAO, 1983). En gran parte de los predios agrícolas andinos se siembra *E. globulus* (Dourojeanni, 2009), lo cual responde a un uso tradicional por encima de aspectos técnicos (Silva, 2012). Esta especie se emplea como linderos perimétricos o como macizos en áreas relegadas, pues sus raíces compiten con los cultivos (Carton & Chávez, 2018), destinando los mejores suelos netamente para cultivos o pastos.

Considerando la necesidad de reducir la concentración de GEI y el vacío de investigación sobre captura de carbono en SSP en los Andes peruanos, así como fomentar la pluralización de la producción rural basada en aspectos técnicos, se plantea la hipótesis que *E. viminalis* tiene potencial para capturar y almacenar carbono en un SSP en conjunto con los demás depósitos en Cajamarca, Perú. Además, se establecen como objetivos específicos determinar el mejor modelo de biomasa área para la especie y estimar las reservas de carbono a nivel de los diferentes componentes del SSP.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El SSP está ubicado en el distrito de Gregorio Pita, provincia de San Marcos, departamento de Cajamarca, en los 07°16'32" de latitud sur y

78°13'07'' de longitud oeste y a una altitud de 2800 m, específicamente en el Anexo Experimental Cochamarca perteneciente al Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) (Figura 1). El SSP pertenece al bosque seco Montano Bajo Tropical (BS-MBT) (GORE Cajamarca, 2019). La precipitación anual es de 733 mm, distribuida principalmente de octubre a marzo. Las temperaturas mínima, promedio y máxima son de 10.7, 16.5 y 24.9 °C respectivamente, con presencia de heladas entre junio y agosto (SENAMHI, 2014; SENAMHI, 2021). Los suelos son de tipo Vertisol crómico y Vertisol lúvico según la clasificación de la FAO y cuentan con depósitos de material detrítico, fino carbonatado, de textura media a pesada en los primeros 30 a 50 cm, (Franco Arcilloso a Franco Arcilloso Limoso); pH ligeramente alcalino (8.0-8.2); y profundidad efectiva moderada a ligeramente profunda (0-30 cm). Estos suelos son de Clase VI según su capacidad de uso potencial (Poma & Vega 1987; Villar et al., 2014).

El SSP fue instalado en el año 2000 sobre una hectárea y tiene a *E. viminalis* por componente

vegetal leñoso. Las semillas para la producción de plántulas provinieron de las investigaciones realizadas por CICAFOR en la introducción de especies forestales en la región Cajamarca. La instalación se realizó a distanciamientos de 3 y 1.5 m entre hileras y plantas respectivamente. En el año 2011, se aprovechó el componente arbóreo a tala rasa, y actualmente el sistema está conformado por 3 206 rebrotes de 9 años comprendidos en 1 377 tocones, con diámetros a 1.3 m de altura (DAP) de 2.5-25.5 cm, alturas totales (H_t) de 4.5-25.1 m y diámetros de copa (DC) de 0.75-2.54 m. Estas variables dasométricas fueron determinadas siguiendo la metodología de Cancino (2006). La composición florística del componente vegetal no leñoso está representada por la asociación de especies forrajeras cultivadas pertenecientes a las familias Poaceae: *Phalaris* sp. (falaris), *Dactylis* sp. (pasto ovido), y *Lolium* sp. (rye grass ecotipo cajamarquino); y Fabaceae: *Trifolium pratense* L. (trébol rojo). Estas especies presentan una densidad relativa de 60, 16, 8, y 17 % respectivamente, determinada según lo establecido por Aguirre (2013).

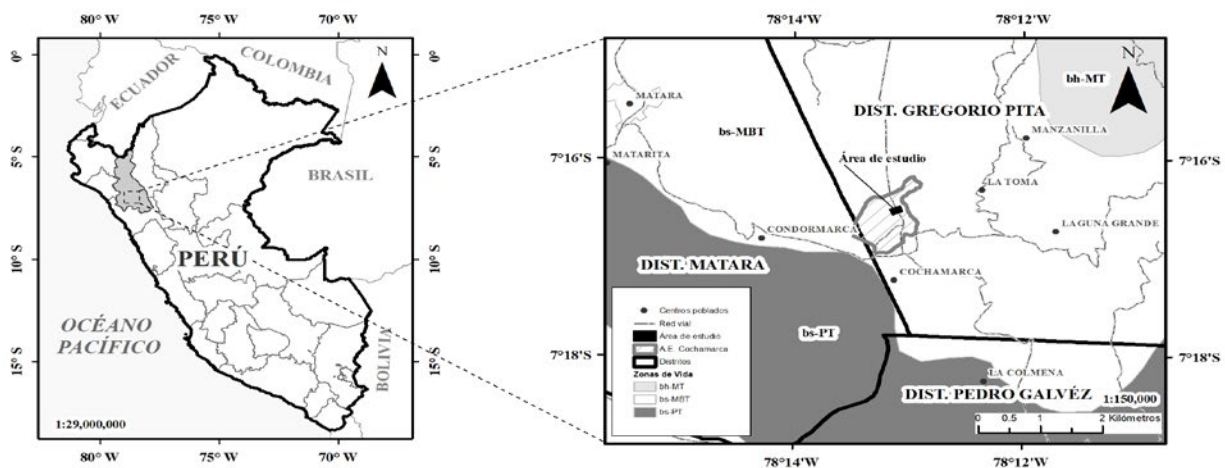


Figura 1. Ubicación del sistema silvopastoril con rebrotes de *E. viminalis* de 9 años instalados a 3 x 1.5 m, Cajamarca, Perú

bh-MT: bosque húmedo Montano Tropical; **bs-MBT:** bosque seco Montano Bajo Tropical; **bs-PT:** bosque seco Premontano Tropical

Tabla 1. Modelos probados para predecir la biomasa aérea en rebrotes de *E. viminalis* de 9 años en un sistema silvopastoril instalado a 3 x 1.5 m, Cajamarca, Perú

N°	Modelo	Fuente	N°	Modelo	Fuente
M1	$W = \beta_0 + \beta_1 DAP + \varepsilon$	1	M8	$W = \beta_0 + \beta_1 DAP^2 + \beta_2 Ht + \beta_3 DAP^2 Ht + \varepsilon$	3
M2	$W = \beta_0 + \beta_1 DAP^2 + \varepsilon$	1	M9	$\ln W = \beta_0 DAP^{\beta_1} + \varepsilon$	4
M3	$W = \beta_0 + \beta_1 DAP + \beta_2 DAP^2 + \varepsilon$	2	M10	$W = \beta_0 [DAP^2 Ht]^{\beta_1} + \varepsilon$	4
M4	$\ln W = \beta_0 + \beta_1 \ln DAP + \varepsilon$	2	M11	$W = \beta_0 DAP^{\beta_1} Ht^{\beta_2} + \varepsilon$	4
M5	$\ln W = \beta_0 + \beta_1 \ln DAP^2 Ht + \varepsilon$	2	M12	$W = \beta_0 DAP^{\beta_1} Ht^{\beta_2} e^{\beta_3 TX} + \varepsilon$	4
M6	$W = \beta_0 + \beta_1 DAP^2 + \beta_2 Ht + \varepsilon$	3	M13	$W = \beta_0 DAP^{\beta_1} Ht^{\beta_2} e^{\left(\beta_3 \frac{TX}{DAP}\right)} + \varepsilon$	4
M7	$W = \beta_0 + \beta_1 DAP^2 + \beta_2 DAP^2 Ht + \varepsilon$	3	M14	$W = \beta_0 DAP^{\beta_1} Ht^{\beta_2} e^{\left(-\beta_3 \frac{TX_1}{DAP}\right)} \left[1 - \left(\frac{TX_2 h}{DAP}\right)^{\beta_4}\right]$	4

W: Biomasa (kg); DAP: Diámetro a la altura del pecho (cm); H: Altura total (m); h: Altura comercial (m); Ln: Logaritmo natural; $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ y β_4 : parámetros de los modelos; ε : error aleatorio; N°: Número.

Fuentes: 1. Soares *et al.* (2011); 2. Brown (1997); 3. Husch *et al.* (2003); 4. Campos & Leite (2013)

Modelo para estimar la biomasa arbórea

Se realizó un censo a la población forestal del sistema, en el cual cada rebrote fue evaluado como individuo independiente. Las variables medidas fueron el DAP y las H_t con forcípula e hipsómetro Suunto respectivamente. Con los datos generados en el censo y mediante un muestreo sistemático, se seleccionaron 44 individuos representativos, abarcando todas las clases diamétricas de la población (ancho de clase de 4.5 cm). La biomasa se estimó siguiendo la metodología establecida por Picard *et al.* (2012), *i.e.*, análisis destructivo, por su exactitud en estimaciones de biomasa de árboles multicaules (Razo *et al.*, 2013). Se seleccionaron los individuos en los componentes fuste con corteza, ramas, ramillas ($d < 2.5$) y hojas y frutos. Estos individuos fueron pesados en campo. De cada componente se extrajeron muestras que fueron codificadas y trasladadas al laboratorio del Programa Nacional Forestal (PNF) para secado a 103 y 70 °C (para madera y hojas respectivamente) hasta que el peso fuera constante (Andrade & Ibrahim, 2003; Rüginitz *et al.*, 2009). Se obtuvieron la biomasa de cada componente (mediante extrapolación) y la total de cada individuo (con la sumatoria de fuste, ramas, ramillas, hojas y frutos).

Las variables dasométricas (DAP y H_t) fueron correlacionadas con la biomasa usando la prueba paramétrica de Pearson ($\alpha \leq 0.05$), en aras de identificar la mejor variable predictora (Ruiz *et al.*, 2019). Se ajustaron 14 modelos para estimar la biomasa (Tabla 1). Los modelos M12 al M14 son los propuestos por Campos y Leite (2013), que integran variables binarias o ficticias (TX). En los dos primeros (M12 y M13) se realizó el ajuste para biomasa total o del fuste con los valores de 0 o 1, y en el último (M14) se realizó el ajuste con valores de 0-0, 1-1 y 0-1 para la biomasa total, del fuste y de hojas más frutos. Para seleccionar los mejores modelos, se consideró la validez estadística mediante los test de "F" y "t" ($\alpha \leq 0.05$), además del coeficiente de determinación (R^2), el coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}), el error cuadrado medio (ECM), el sesgo (E) y el error padrón residual (S_{yx}). Además, se consideró la homocedasticidad y normalidad de los residuos (Cancino, 2006; Soares *et al.*, 2011; Hirigoyen *et al.*, 2021).

Estimación de carbono y CO₂ en el SSP

La biomasa de los rebrotes se calculó con la ecuación alométrica que mejor estimó la biomasa total

y con los datos generados en el censo. Se cuantificaron la necromasa (la capa de órganos y tejidos muertos desprendidos de los árboles como ramas, ramillas, hojas, flores, frutos y ritidomas) y la biomasa del componente herbáceo utilizando 12 parcelas de muestreo de 0.25 m² distribuidas de forma sistemática (Andrade & Ibrahim, 2003). Se colectó y cortó todo el material registrando su peso verde total, y se extrajo una submuestra de 200 g que fue trasladada al laboratorio para secado a 60 °C (Rügnitz *et al.*, 2009). El factor de conversión entre materia seca y fresca se determinó usando la siguiente fórmula:

$$MS_{muestra} = (MS_{submuestra} / MF_{submuestra}) \times MF_{muestra}$$

donde $MS_{muestra}$ es la materia seca de la muestra (kg/0.25m²), $MF_{submuestra}$ es la materia fresca de la submuestra (kg), $MS_{submuestra}$ es la materia seca de la submuestra (kg) y $MF_{muestra}$ es la materia fresca de la muestra (kg/0.25m²). Acto seguido, se estimó por extrapolación la cantidad de biomasa por hectárea.

El contenido de carbono (C) y dióxido de carbono equivalente (CO₂eq) en la biomasa seca se calculó multiplicando la biomasa seca por los factores 0.5 y 3.67 (IPCC, 2014). El carbono orgánico del suelo (COS) fue muestreado a una profundidad de 30 cm (Rügnitz *et al.*, 2009) en las parcelas donde se evaluaron las pasturas. Se extrajo una submuestra de medio kilogramo, que fue analizada en el laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes de la Universidad Nacional Agraria la Molina (Perú) para determinar la densidad aparente (Da) y la concentración de carbono orgánico (% CO). El COS almacenado en el sistema se estimó mediante la fórmula usada por Miranda *et al.* (2007):

$$COS = Fc * Da * P * A$$

donde COS es el carbono orgánico almacenado en el suelo del SSP (Mg C ha⁻¹), Fc es la fracción de carbono (%CO/100), Da es la densidad aparente del suelo (Mg/m³), P es la profundidad de muestreo (m) y A es el área del SSP (m²).

Procesamiento de datos y análisis estadístico

Los datos de biomasa y carbono fueron calculados en Excel (Microsoft, 2020) y el análisis estadístico en R (R Development Core Team, 2020). La correlación y modelado se llevaron a cabo con los paquetes y comandos cor, corrplot, lm y nls (Bates & Chambers 1992; Chambers, 1922; Wei *et al.*, 2021).

RESULTADOS

Modelamiento de la biomasa arbórea

La biomasa arbórea se distribuyó principalmente en el fuste, y en mínima proporción en las hojas, ramas, ramillas y frutos, con 87.9, 4.8, 3.6, 3.3 y 0.4 % respectivamente (Figura 2a). Se evidenció que la distribución de la biomasa varió entre clases diamétricas, existiendo mayor variabilidad principalmente en las primeras clases y/o componentes menores. El porcentaje de biomasa del fuste aumentó hasta la clase [11.5-16.0] para posteriormente disminuir, contrario a lo que ocurrió en las hojas (Figuras 2b y 2e). Además, se evidenció que, a medida que los rebrotes crecían, su biomasa en las ramas y frutos aumentó, pero disminuyó la existente en las ramillas (Figura 2c, 2d y 2f).

El DAP presentó mayor correlación con la biomasa total y de componentes ($p < 0.05$) en comparación con la variable H_v , siendo la principal variable predictora de los modelos. Hubo un alto grado de asociación entre DAP y la biomasa total y del fuste, pero esta disminuyó para los componentes menores, como es el caso de las ramas, ramillas y frutos (Figura 3).

Los modelos que presentaron significancia (tests de "F" y "t") y mejores indicadores estadísticos se muestran en la Tabla 2. El modelado de los frutos no presentó ajustes significativos. Las funciones de los modelos seleccionados para estimar la biomasa total (M4), fuste (M11), ramas (M11), hojas (M9) y biomasa total o del fuste u hojas más

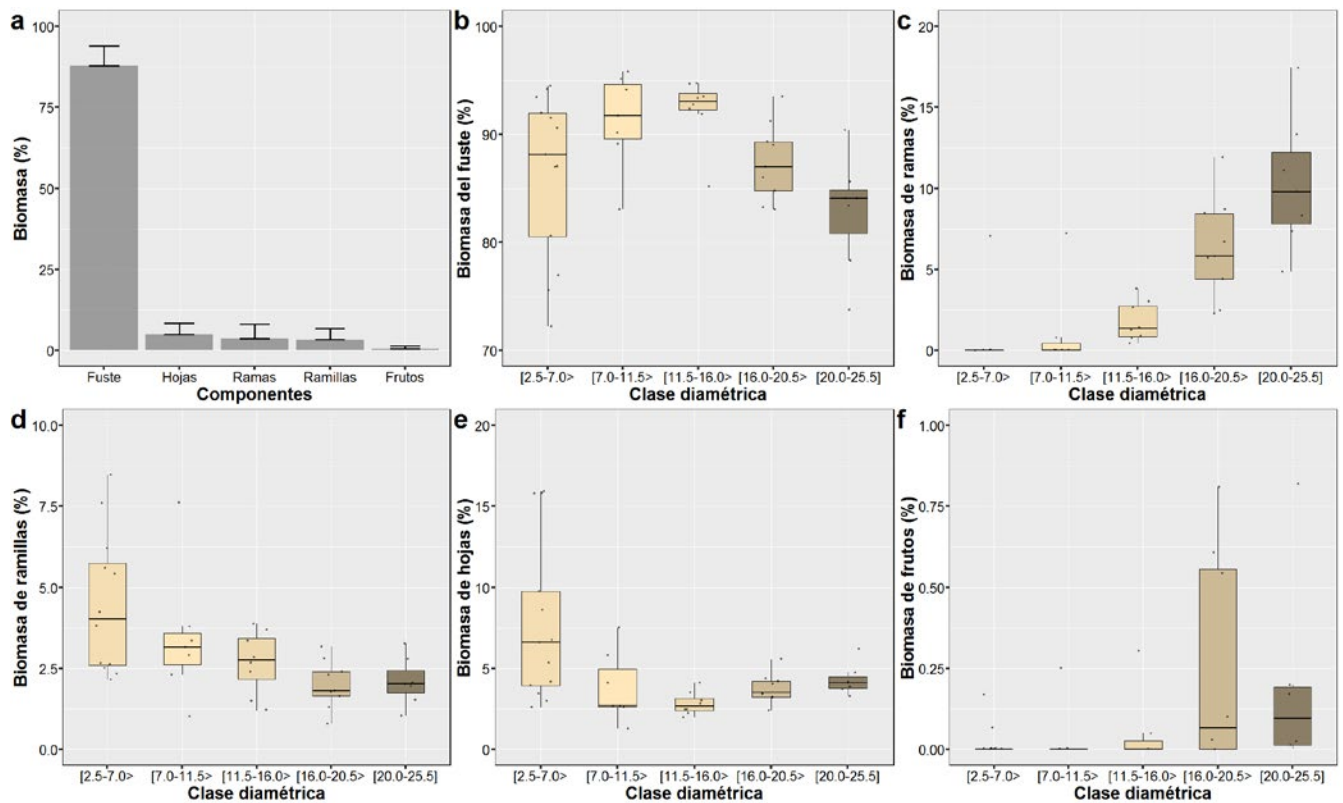


Figura 2. Distribución (%) de la biomasa según componente y clase diamétrica en rebrotes de *E. viminalis* de 9 años en un sistema silvopastoril instalado a 3 x 1.5 m, Cajamarca, Perú

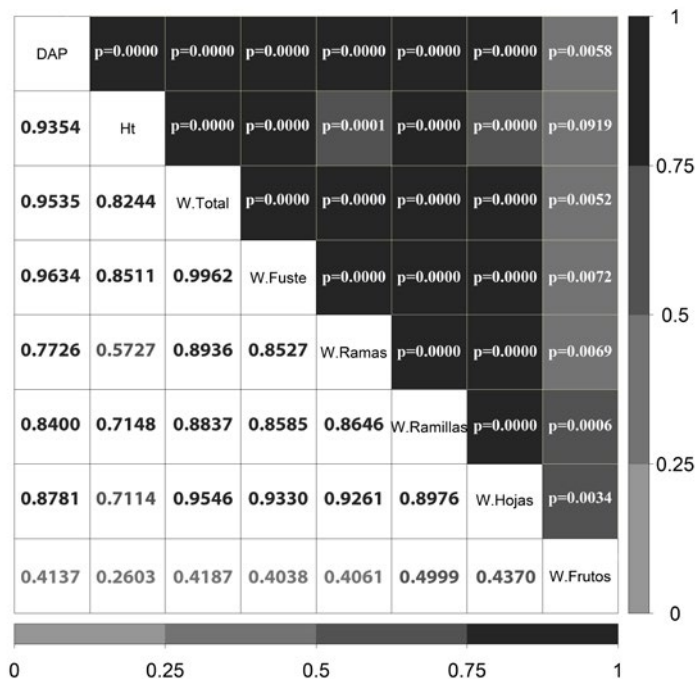


Figura 3. Correlación de variables dasométricas y biomasa en rebrotes de *E. viminalis* de 9 años en un sistema silvopastoril instalado a 3 x 1.5 m, Cajamarca, Perú

frutos (M14) presentaron mejor conformación con respecto a los datos observados en campo (Figuras 4a, 4b, 4c, 4e y 4f) en comparación con el de ramillas (M4) (Figura 4d). La variabilidad de la biomasa total fue explicada en un 98.84 % por DAP, así como en 88.45 y 73.12 % en hojas y ramillas respectivamente. En el caso del fuste y las ramas, fue necesario incorporar la H_t para explicar la variabilidad de 99.35 y 88.50 % respectivamente. El grado de explicación de los modelos disminuyó conforme los componentes contenían menor biomasa, lo cual concuerda con lo obtenido en la correlación (Figura 3). No obstante, el uso de variables ficticias en los modelos M12 y M14 permitió una mejor estimación de estos componentes ($R^2=0.9902$ y 0.9897).

Estimación de carbono y CO₂ en el SSP

La biomasa acumulada en el SSP se distribuyó principalmente en los rebrotes de *E. viminalis*, con 113.57 Mg.ha⁻¹ (89.0 %), seguido de hojarasca y

herbácea, con 8.72 y 5.34 Mg.ha⁻¹ respectivamente (6.8 y 4.2 %). Existe un total de 127.64 Mg.ha⁻¹ de biomasa en todo el sistema. El carbono capturado en el sistema estuvo mayoritariamente en el suelo, con 91.38 Mg.ha⁻¹ (58.9 %), seguido de carbono arbóreo con 56.79 Mg.ha⁻¹ (36.6 %), hojarasca con 4.36 Mg.ha⁻¹ (2.8 %) y, en menor proporción, el herbáceo con 2.67 Mg.ha⁻¹ (1.7%). El carbono y CO₂eq capturados en todo el sistema fueron 155.20 y 569.58 Mg.ha⁻¹.

El componente vegetal leñoso del sistema logró acumular 122.29 Mg.ha⁻¹ de biomasa (arbórea y hojarasca), los cuales representaron un total de 61.15 y 224.41 Mg.ha⁻¹ de C capturado y CO₂eq respectivamente. El incremento anual de biomasa en los rebrotes fue de 12.62 Mg MS ha⁻¹, lo cual representa una fijación 6.31 Mg.C ha⁻¹ año⁻¹, con un secuestro de 23.16 Mg CO₂eq ha⁻¹ año⁻¹. De forma individual, cada rebrote, así como el árbol que lo origina, capturan anualmente 1.97 y 4.59 kg C, equivalentes a una fijación de 7.22 y 16.83 kg CO₂ año⁻¹ respectivamente.

Tabla 2. Modelos con mejores ajustes para predecir la biomasa total y por componente en rebrotes de *E. viminalis* de 9 años en un sistema silvopastoril instalado a 3 x 1.5 m, Cajamarca, Perú

Biomasa	N°	Modelo	R ²	R ² _{adj}	ECM	E	S _{yx}
Total	M4	$\ln W = -2.1864 + 2.4502 \ln DAP$	0.9884	0.9881	9.7692	0.1633	62.5532
Fuste	M11	$W = 0.0351 DAP^{1.8421} H_t^{0.9273}$	0.9935	0.9932	6.1233	0.0491	38.7272
Ramas	M11	$W = 0.0082 DAP^{6.4160} H_t^{-3.9142}$	0.8850	0.8750	4.5937	0.0596	22.0304
Ramillas	M4	$\ln W = -4.378 + 1.8617 \ln DAP$	0.7312	0.7247	1.0388	0.1702	6.6513
Hojas	M9	$\ln W = 0.0020 DAP^{2.7102}$	0.8845	0.8817	1.3617	0.0337	8.7189
Total/fuste	M12	$W = 0.0531 DAP^{2.0689} H_t^{0.6220} e^{-0.1690 TX}$	0.9902	0.9898	8.2676	0.1603	74.8660
Total/Fuste/ hojas más frutos	M14	$W = 0.0656 DAP^{2.0030} H_t^{0.6161} e^{(-3.1964 \frac{TX_1}{DAP})} \left[1 - \left(\frac{TX_2 h}{DAP} \right)^{0.17528} \right]$	0.9897	0.9893	7.8518	1.4825	87.4335

W: Biomasa (kg); DAP: Diámetro a 1,3 m de altura (cm); H_t : Altura total (m); h: Altura comercial (m); Ln: Logaritmo natural; TX_2 : Variable ficticia con valores de 0 o 1 para estimar la biomasa total o del fuste; TX_1 y TX_2 : Variables ficticias con valores de 0-0, 1-1 y 0-1 para estimar la biomasa total o del fuste o de hojas más frutos; R²: Coeficiente de determinación; R²_{adj}: Coeficiente de determinación ajustado; ECM Error cuadrado medio; E: Sesgo; S_{yx}: Error padrón residual; N°: Número.

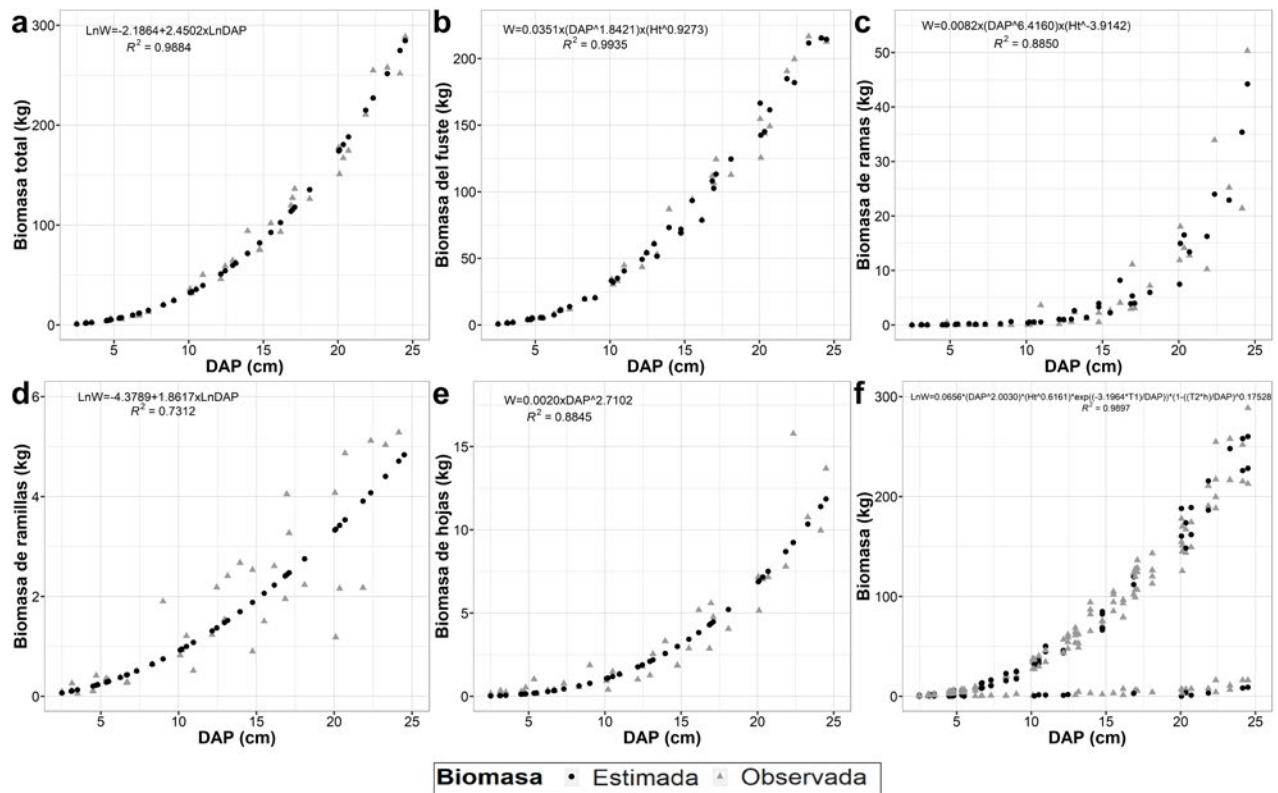


Figura 4. Distribución de biomasa observada y estimada en rebrotes de *E. viminalis* de 9 años en un sistema silvopastoril instalado a 3 x 1.5 m, Cajamarca, Perú

DISCUSIÓN

Modelamiento de la biomasa arbórea

En la actualidad, son nulos los reportes de estimación de biomasa de *E. viminalis* en la región de Cajamarca y en el Perú. La biomasa se distribuyó principalmente en el fuste, y las proporciones entre los componentes variaron conforme crecieron los individuos, resultados similares a los obtenidos con la misma especie en Argentina (Ferrere *et al.*, 2008; Ferrere *et al.*, 2014). Al nivel de otras especies del género *Eucalyptus*, se han reportado las mismas tendencias para *E. urograndis* y *E. grandis* en Perú y Brasil (Riberio *et al.*, 2015; Valverde *et al.*, 2019; Ramírez & Chagna, 2019). La variación en la distribución de biomasa entre los componentes menores

está asociada principalmente a su naturaleza efímera, pues estos varían con el desarrollo de los rebrotes (Kuyah *et al.*, 2013; Dimobe *et al.*, 2018).

El DAP fue la principal variable predictora de la biomasa total, ramillas y hojas, comprobando lo sostenido por Kuyah *et al.* (2013) y Ruiz *et al.* (2019), quienes señalan la existencia de altas correlaciones y regresiones significativas con esta variable predictora. Sin embargo, cuando es alta, la variación no logra explicar adecuadamente, pues se considera que los individuos con el mismo diámetro presentan la misma estimación, por lo cual es necesario incorporar de más variables (Diéguez *et al.*, 2005; Cancino, 2006). Tal es el caso de las ramas, donde el modelo que estimó mejor la biomasa incluyó la H_t . Los ajustes estimaron adecuadamente la biomasa total y del fuste, presentando R^2 y R^2_{adj} cercanos a 1 y ECM , E y

Tabla 3. Biomasa acumulada y carbono almacenado en Mg.ha⁻¹ a nivel de los cuatro depósitos del sistema silvopastoril con rebrotes de *E. viminalis* de 9 años instalados a 3 x 1.5 m, Cajamarca, Perú

	Arbóreo	Hojarasca	Herbácea	Suelo	Total
Biomasa	113.57 (89.0)	8.72 (6.8)	5.34 (4.2)	-	127.64 (100.0)
Carbono	56.79 (36.6)	4.36 (2.8)	2.67 (1.7)	91.38 (58.9)	155.20 (100.0)
CO₂eq capturado	208.42 (36.6)	16.00 (2.8)	9.80 (1.7)	335.36 (58.9)	569.58 (100.0)

Mg: mega gramo (equivalente a tonelada); ha: hectárea. Los valores en paréntesis corresponden al porcentaje.

S_{yx} a 0, similares a los obtenidos para *E. viminalis* en Argentina (Ferrere et al., 2008) y para otras especies de eucaliptos (Mello & Gonçalves 2008; Hirigoyen et al., 2021). El grado de estimación disminuyó para los componentes menores debido al menor grado de correlación con las variables independientes, lo cual concuerda con el reporte de Ferrere et al. (2014) para la misma especie y con otras investigaciones (Muñoz et al., 2008; Fonseca et al., 2021). Esto, debido a que los componentes menores (ramillas, follaje, flores y frutos) presentan efimeridad y dependen de aspectos fisiológicos que afectan las relaciones alométricas (Rubilar et al., 2005). Los modelos M12 y M14, que usaron variables binarias, presentaron buenos indicadores ($R^2 = 0.9902$ y 0.9897 ; $E = 0.1603$ y 1.4825), semejantes a los obtenidos por Soares et al. (2007). Esto demuestra que el uso de estas variables genera consistencia en las estimaciones por componentes, en especial de los menores (Campos & Leite, 2013).

Estimación de carbono y CO₂ en el SSP

El carbono depositado en la fracción aérea del componente forestal de 9 años (56.79 Mg.ha⁻¹) es comparable con lo estimado por Álvarez et al. (2005) y Cárdenas (2016), quienes refieren reservas de carbono entre 71 y 213 Mg.ha⁻¹ para *E. globulus* en macizos de 13 y 24 años en España y de 15 años en Perú. Sin embargo, esto es superior a lo reportado por Cuellar et al. (2016) en macizos de *E. globulus* de 25 años en Junín-Perú, que almacenaron 30.8 Mg.C ha⁻¹ en promedio. El carbono capturado anualmente por el componente forestal

(6.31 Mg.C ha⁻¹) fue inferior en 0.19 Mg.C ha⁻¹ año⁻¹ para *E. grandis* ubicados en Ecuador (Ramírez & Chagna 2019), pero superior en 1.42 y 0.97 Mg.C ha⁻¹ año⁻¹ para macizos de *E. globulus* instalados en Ancash y La Libertad (Perú) respectivamente (Cárdenas 2016; Alfaro 2017). En la región de Cajamarca, otras especies forestales de importancia económica y ecológica como *Pinus patula* y *Pinus radiata* reportaron valores de 5.84 y 5.44 Mg.C ha⁻¹ año⁻¹ respectivamente en plantaciones de 13 años ubicadas en Porcón (Mendo 2008). Asimismo, para macizos de *P. patula* de 10 años, se reportó 1.69 Mg.C ha⁻¹ año⁻¹ en Chota (Mirez, 2021) y, para *Polylepis racemosa* en un SSP de 17 años, se registraron valores de 5.82 Mg.C ha⁻¹ año⁻¹ en La Encañada (Mantilla 2016). Los resultados obtenidos en la investigación (6.31 Mg.C ha⁻¹ año⁻¹) son superiores a los reportes existentes para la región de Cajamarca en otras especies forestales, demostrando la eficiencia de la especie para capturar carbono, pues es una especie latifoliada de hoja ancha que absorbe el CO₂ en mayores cantidades y resiste a las heladas (INFOR & FAO, 1983; Villar et al. 2014). Además, el elevado nivel de carbono almacenado está probablemente asociado al tipo de plantación agroforestal (con arreglo espacial geométrico) y la alta capacidad de rebrote del eucalipto (con 3 206 rebrotes ha⁻¹), que, de acuerdo con el principio modular, presentan características de crecimiento independiente (Causton 1985; Picard et al., 2012).

La capacidad de la necromasa forestal para retener carbono (4.36 Mg.ha⁻¹) fue similar a la

obtenido con *E. globulus* (4.2 Mg.C ha^{-1}) en Perú (Cuellar *et al.*, 2016), pero superior a la reportada en SSP instalados en México y Perú, que almacenaron 1.2 y $2.62 \text{ Mg.C ha}^{-1}$, respectivamente (Espinoza *et al.*, 2012; Oliva *et al.*, 2017). Los altos niveles de carbono almacenado en este depósito pueden atribuirse a la densidad del componente forestal del sistema (Anguiano *et al.*, 2013) y las características de las hojas de eucalipto, que presentan corta vida y caen en gran cantidad durante la época de estiaje (Cuellar *et al.*, 2016). Esto, sumado a la porción de necromasa desprendida de la corteza.

Los pastos del sistema pueden ser cortados tres veces al año (Villar *et al.*, 2014), lo cual representaría una captura de $8.01 \text{ Mg.C ha}^{-1}$, una cantidad superior a la estimada en un SSP ubicado en Paraguay ($6.01 \text{ Mg.C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) (Díaz *et al.*, 2020). Lo anterior refleja que las pasturas tropicales tienen gran potencial para la producción primaria neta (Botero 2003), en especial la asociación entre gramíneas y leguminosas, que han dado buenos resultados de acuerdo con su genotipo en la zona de Cajamarca (Vallejos *et al.*, 2020; Vallejos *et al.*, 2021).

El contenido de COS del SPP ($91.38 \text{ Mg.C ha}^{-1}$) fue superior al manifestado por Oliva *et al.* (2017), quienes determinaron un almacenamiento de $81.24 \text{ Mg.C ha}^{-1}$ en un SPP andino compuesto por *Pinus patula* y herbáceas nativas. De igual forma, dicho contenido fue superior al reporte de Lok *et al.* (2013), quienes cuantificaron el COS de tres sistemas ganaderos tropicales, determinando niveles máximos de $65.3 \text{ Mg.C ha}^{-1}$ para un SSP basado en *Panicum maximum* Jacq. y *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit.

El sistema conformado por *E. viminalis* presentó mayor COS que otros usos de la tierra como maticos de *E. globulus* y pasturas, los cuales refieren cantidades de 59.81 a $155.77 \text{ Mg.C ha}^{-1}$ para el primer caso y $38.73 \text{ Mg.C ha}^{-1}$ para el segundo (Cuellar *et al.*, 2016; Cárdenas 2016). El almacenamiento de COS depende de la especie forestal, la combinación de los agroecosistemas, las condiciones climáticas y las propiedades del suelo (Bravo *et al.*, 2007), así como con la cantidad y calidad

de biomasa devuelta al suelo y la MO (Lok *et al.*, 2013; López *et al.*, 2015). Los altos niveles de COS del sistema son atribuibles a la capacidad que este tiene para conservarlos, aportando y reciclando MO. Dichas características convierten a los suelos de los SAF andinos en importantes reservorios de carbono (Andrade & Ibrahim, 2003).

El carbono total almacenado en el sistema ($155.20 \text{ Mg.C ha}^{-1}$) está comprendido en los valores reportados para los SAF en zonas tropicales, que van de 65.6 a $338.9 \text{ Mg.C ha}^{-1}$ (de Jong *et al.*, 2000). Además, esto es superior a lo reportado para SSP instalados en Paraguay, Perú y México, que capturaron 92.13 , 112.56 y $36.72 \text{ Mg.C ha}^{-1}$, respectivamente (López *et al.*, 2015; Oliva *et al.*, 2017; Díaz *et al.*, 2020). Las variaciones en las reservas de carbono entre los SSP y sus componentes son atribuidas al clima, el tipo de suelo, las especies forestales, la estructura del sistema y la densidad de los árboles (Anguiano *et al.*, 2013).

CONCLUSIONES

El *Eucalyptus viminalis* tiene potencial para capturar y almacenar carbono en una asociación silvopastoril, *i.e.*, en comparación con otras especies forestales instaladas en otros sistemas de uso de la tierra en la región de Cajamarca, debido a que es una especie latifoliada de hoja ancha con alta capacidad de rebrotes y resistencia a heladas, así como a la efimeridad de sus componentes menores, que contribuyen a la fijación del carbono en el suelo. Puede concluirse que la especie, instalada bajo este sistema, representa un importante reservorio de carbono que aporta a contrarrestar el cambio climático en los Andes peruanos. Además, por su plasticidad, esta logra hacer compatible la producción y la conservación. El DAP fue la variable que permitió explicar la biomasa existente en el componente arbóreo aéreo mediante el modelo $\text{Ln } W = -2.1864 + 2.4502 \text{Ln } \text{DAP}$, con un R^2 de 0.99 . El carbono capturado en el sistema fue de $155.20 \text{ Mg.C ha}^{-1}$, distribuido principalmente en el suelo y los rebrotes,

con 91.38 y 56.79 Mg.ha⁻¹ respectivamente, valores superiores a los reportados en otros estudios.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Programa Presupuestal – 130 *Competitividad y aprovechamiento sostenible de los recursos forestales y de fauna silvestre* y al INIA por el financiamiento para la ejecución de la investigación.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

CONTRIBUCIÓN POR AUTOR

F. E. M. B. gestionó, ejecutó y dirigió la investigación y apoyó en la revisión del manuscrito; W. M. C. efectuó los trabajos de la investigación, sistematizó la información y redactó el artículo investigación; J. R. B. V. elaboró script de figuras, correlación y modelamiento, además de apoyar en la revisión del manuscrito; J.C.V.A. apoyó en el análisis y redacción del artículo; y U. P. G. apoyó en el análisis y redacción del artículo.

REFERENCIAS

- Aguirre, Z.** (2013). *Guía de métodos para medir la biodiversidad*. Universidad Nacional de Loja.
- Alfaro, R. O.** (2017). *Captura de carbono en rebrotes de Eucalyptus globulus Labill. "eucaliptus" en Motil, provincia de Otuzco de departamento de La Libertad – Perú*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Trujillo].
<https://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/7969>
- Álvarez, J. G., Balboa, M. A., Merino, A., & Rodríguez, R.** (2005). Estimación de la biomasa arbórea de "*Eucalyptus globulus*" y "*Pinus pinaster*" en Galicia. *Recursos Rurais: revista oficial do Instituto de Biodiversidade Agraria e Desenvolvimento Rural*, 1(1), 21-30.
<https://doi.org/10.15304/rr.id5337>
- Andrade, H. J., & Ibrahim, M. A.** (2003). Cómo monitorear el secuestro de carbono en los sistemas silvopastoriles. *Agroforestería en las Américas*, 10(39), 109-116.
https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/6950/Como_monitorear_el_secuestro.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Anguiano, J. M., Aguirre, J., & Palma, J. M.** (2013). Secuestro de carbono en la biomasa aérea de un sistema agrosilvopastoril de *Cocos nucifera*, *Leucaena leucocephala* Var. Cunningham y *Pennisetum purpureum*. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 17(1), 149-160.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=83725698009>
- Bates, D. M., & Chambers, J. M.** (1992). *Nonlinear models*. Wadsworth & Brooks/Cole.
- Botero, J. A.** (2013). Contribución de los sistemas ganaderos tropicales al secuestro de carbono. En M. D. Sánchez & M. Rosales (Eds.), *Agroforestería para la Producción Animal en América Latina – II – Memorias de la Segunda Conferencia Electrónica*. FAO.
- Bravo, F., Delgado, J., Gallardo, J., Bravo, A., Ruiz, R., Merino, A., Montero, G., Cámara, A., Navarro, R., Ordoñez, C., & Canga, E.** (2007). *El papel de los bosques españoles en la mitigación del cambio climático: métodos para cuantificar la fijación de CO₂ en los sistemas forestales*. Fundación Gas Natural.
- Brown, S.** (1997). Estimating biomass and biomass change of tropical forests: A Primer (Forestry Paper 134). FAO.
- Campos, J. C. C., & Leite, H. G.** (2013). *Mensuração florestal: perguntas e respostas*. Universidade Federal de Viçosa.
- Cancino, J.** (2006). *Dendrometría básica*. Universidad de Concepción.
- Cappa, E. P., Pathauer, P. S., & López, G.A.** 2010. Provenance variation and genetic parameters of *Eucalyptus viminalis* in Argentina. *Tree Genetics & Genomes*, 6, 981-994.
<https://doi.org/10.1007/s11295-010-0307-9>

- Cárdenas, R.C.** (2016). *Evaluación del potencial de los bosques de Eucalyptus globulus y Pinus radiata como sumideros de carbono en el entorno del Parque Nacional Huascarán (Perú)*. [Tesis de doctorado, Universidad de Salamanca].
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=79290>
- Carton, C., & Chávez, A.** (2018). *Porcón: Medio siglo de forestación en los Andes de Cajamarca – Perú*. Lluvia Editores.
- Causton, D. R.** (1985). Biometrical, structural and physiological relationships among tree parts. En M. G. R. Cannell & J. E. Jackson (eds.), *Attributes of Trees as Crop Plants* (pp. 137-159). Institute of Terrestrial Ecology.
- Chambers, J. M.** (1992). *Linear models*. Wadsworth & Brooks/Cole.
- Cuellar, J. E., & Salazar, E. J.** (2016). *Dinámica del carbono almacenado en los diferentes sistemas de uso de la tierra en el Perú*. Instituto Nacional de Innovación Agraria.
- de Jong, B. H.** (2000). *Forestry for mitigating the greenhouse effect: An ecological and economic assessment of the potential of land use to mitigate CO₂ emissions in the Highlands of Chiapas, Mexico* [Tesis de doctorado, Wageningen University and Research].
<http://bibliotecasibe.ecosur.mx/sibe/book/000022557>
- Díaz, M. I., Ríos, J. R., Moreno, H., & Vera, M.L.** (2020). Contenido de carbono en un sistema silvopastoril del Chaco central paraguayo. *CFORES: revista cubana de ciencias forestales*, 8(2), 344-357.
<http://cfores.upr.edu.cu/index.php/cfores/article/view/608>
- Diéguez A., U., Castedo D., F., Barrio A., M., Álvarez G., J. G., Rojo A., A., & Ruiz G., A. D.** (2005). *Prácticas de dasometría*. Universidad Santiago de Compostela.
- Dimobe, K., Mensah, S., Goetze, D., Ouédraogo, A., Kuyah, S., Porembski, S., & Thiombiano, A.** (2018). Aboveground biomass partitioning and additive models for *Combretum glutinosum* and *Terminalia laxiflora* in West Africa. *Biomass and Bioenergy*, 115, 151-159.
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.04.022>
- Dourojeanni, M. J.** (2009). *Crónica forestal del Perú*. San Marcos-UNALM.
- Espinoza, W., Krishnamurthy, L., Vázquez, A., & Torres, A.** (2012). Almacén de carbono en sistemas agroforestales con café. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 18(1), 57-70.
<https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2011.04.030>
- Ferrere, P., Lupi A. M., & Boca, R. T.** (2014). Estimación de la biomasa aérea en árboles y rodales de *Eucalyptus viminalis* Labill. *Quebracho*, 22(1-2), 100-113.
<http://www.scielo.org.ar/pdf/quebra/v22n2/v22n2a05.pdf>
- Ferrere, P., Lupi, A. M., Boca, R., Nakama, V., & Alfieri, A.** (2008). Biomasa en plantaciones de *Eucalyptus viminalis* Labill. de la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Ciência Florestal, Santa Maria*, 18(3), 291-305.
<https://doi.org/10.5902/19805098440>
- Fonseca, W., Ávila, C., Murillo, R., & Rojas, M.** (2021). Predicción de biomasa y carbono en plantaciones clonales de *Tectona grandis* L.f. *Colombia Forestal*, 24(1), 31-44.
<https://doi.org/10.14483/2256201X.15961>
- Ghosh Dasgupta, M., Burragoni, S., Amrutha, S., Muthupandi, M., Muneera Parveen, A., Sivakumar, V., & Ulaganathan, K.** (2020). Diversity of bacterial endophyte in *Eucalyptus* clones and their implications in water stress tolerance. *Microbiological Research*, 241, 126579.
<https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126579>
- Gobierno Regional de Cajamarca (GORE CAJAMARCA).** (2019). *Mapoteca virtual: Shapes ZEE-OT Cajamarca – medio biológico/zonas de vida*.
<https://zeeot.regioncajamarca.gob.pe/node/588>
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC).** (2014). *Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad – Resumen para responsables de políticas. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación de IPCC*. Organización Meteorológica Mundial.

- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC).** (2019). *Calentamiento global de 1,5 °C: 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.* Organización Meteorológica Mundial.
- Hansen, J., Sato, M., Kharecha, P., Beerling, D., Berner, R., Masson, V., Pagani, M., Raymo, M., Royer, D. L., & Zachos, J.C.** (2008). Target atmospheric CO₂: Where should humanity aim? *The Open Atmospheric Science Journal*, 2, 217-231.
<https://doi.org/10.2174/1874282300802010217>
- Hirigoyen, A., Resquin, F., Navarro-Cerrillo, R., Franco, J., & Rachid-Casnati, C.** (2021). Stand biomass estimation methods for *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus dunnii* in Uruguay. *Bosque*, 42(1), 53-66.
<http://doi.org/10.4067/S0717-92002021000100053>
- Hunter, G. C., Crous, P. W., Carnegie, A. J., & Wingfield, M. J.** (2009). Teratosphaeria nubilosa, a serious leaf disease pathogen of *Eucalyptus* spp. in native and introduced áreas. *Molecular Plant Pathology*, 10(1), 1-14.
<https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2008.00516.x>
- Husch, B., Beers, T. W., & Kershaw, J. A.** (2002). *Forest mensuration*. Jhon Wiley & Sons.
- Instituto Nacional Forestal y de Fauna (INFOR) & Organización de las Naciones unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO)** (1983). *Ensayos de especies forestales exóticas y guía para su zonificación en la sierra peruana*. Proyecto FAO/Holanda/INFOR.
- International Union of Forestry Research Organizations (IUFRO).** *Eucalyptus 2018: Managing Eucalyptus plantations under global changes*.
<https://agritrop.cirad.fr/589039/1/ID589039.pdf>
- Kuyah, S., Dietz, J., Catherine, M., van Noordwijk, M., & Neufeldt, H.** (2013). Allometry and partitioning of above- and below-ground biomass in farmed eucalyptus species dominant in Western Kenyan agricultural landscapes. *Biomass and Bioenergy*, 55, 276-284.
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.02.011>
- Lok, S., Fraga, S., Noda, A., & Gracia, M.** (2013). Almacenamiento de carbono en el suelo de tres sistemas ganaderos tropicales en explotación con ganado vacuno. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 47(1), 75-82.
<https://www.redalyc.org/pdf/1930/193028545014.pdf>
- López, J. G., Casanova, F., Villanueva, G., Interian, V. M., & Hernández, J. J.** (2015). Almacenamiento de carbono en un sistema silvopastoril intensivo de *Leucaena leucocephala* y *Panicum maximum*, en Michoacán, México. En F. Paz, J. Wong & R. Torres (Eds.), *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2015* (pp. 179-185). Programa Mexicano del Carbono.
- Mantilla, W.** (2016). *Estimación de la biomasa y carbono capturado por árboles de Polylepsis racemosa Ruiz & Pav. de un sistema agroforestal establecido en La Encañada – Cajamarca*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Cajamarca].
- Mello, S. L. M., & Gonçalves, J. L. M.** (2008). Equações para estimar a biomassa da parte aérea e do sistema radicular em povoamentos de *Eucalyptus grandis* em sítios com produtividades distintas. *Revista Árvore*, 32(1), 101-111.
<https://doi.org/10.1590/s0100-67622008000100012>
- Mendo, M. H.** (2008). *Valoración económica de los bienes y servicios ambientales del bosque granja Porcón, Cajamarca Perú” 2007- 2008* [Tesis de doctorado, Universidad Nacional de Trujillo].
<https://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/5301>
- Microsoft** (2020). EXCEL S11-32® (versión windows 7).
<https://support.office.com/es-emx>
- Miranda, T., Machado, R., Machado, H., & Duquesne, P.** (2007). Carbono secuestrado en ecosistemas agropecuarios cubanos y su valoración económica. *Pastos y Forrajes*, 30(4), 483-491.

[http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_art-text&pid=S0864-03942007000400007#:~:text=El%20an%C3%A1lisis%20mostr%C3%B3%20un%20estimado,contribuci%C3%B3n%20econ%C3%B3mica%20\(tabla%205\).](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_art-text&pid=S0864-03942007000400007#:~:text=El%20an%C3%A1lisis%20mostr%C3%B3%20un%20estimado,contribuci%C3%B3n%20econ%C3%B3mica%20(tabla%205).)

Mírez, R. Y. (2021). *Estimación de biomasa y contenido de carbono en Pinus patula de diferentes edades en la jalca del distrito de Chalamarca, Chota – Cajamarca* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Autónoma de Chota]. <https://repositorio.unach.edu.pe/handle/20.500.14142/150>

Muñoz, F., Rubilar, R., Espinosa, M., Cancino, J., Toro, J., & Herrera, M. (2008). The effect of pruning and thinning on above ground aerial biomass of *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden. *Forest Ecology and Management*, 255(3-4), 365-73. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.09.063>

National Aeronautics and Space Administration (NASA) (2021). *Global climate change vital signs of the planet: Carbon dioxide*. <http://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/>

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) (20 de enero de 2021). *Trends in atmospheric carbon dioxide: Recent monthly average Mauna Loa CO₂*. <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/index.html>

Oberschelp, G. P. J., Guarnaschelli, A. B., Teson, N., Harrand, L., Podesta, F. E., & Margarit, E. (2020). Cold acclimation and freezing tolerance in three *Eucalyptus* species: A metabolomic and proteomic approach. *Plant Physiology and Biochemistry*, 154, 316-327. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.05.026>

Oliva, M., Culqui, L., Leiva, S., Collazos, R., Salas, R., Vásquez, H. V., & Maicelo, J. L. (2017). Reserva de carbono en un sistema silvopastoril compuesto de *Pinus patula* y herbáceas nativas. *Scientia Agropecuaria*, 8(2), 149-157. <http://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2017.02.07>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) (2020). *El estado mundial de la agricultura y la alimentación: superar los desafíos relacionados con el agua en la agricultura*. FAO.

Picard, N., Saint, L., & Henry, M. (2012). *Manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles: del trabajo de campo a la predicción*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement.

Poma W., & Vega-Bazan M. (1987). *Estudio de suelos y plan de manejo del Centro Agroforestal Cochamarca*. Centro de Investigación y Capacitación Forestal.

R Development Core Team (2020). *R: A language and environment for statistical computing*. <http://www.R-project.org>

Ramírez, J. L., & Chagna, E. J. (2019). Secuestro de carbono en la biomasa aérea de una plantación de *Eucalyptus grandis* W. Hill. *CFORES: revista cubana de ciencias forestales*, 7(1), 86-97. <http://scielo.sld.cu/pdf/cfp/v7n1/2310-3469-cfp-7-01-86.pdf>

Razo, R., Gordillo, A., Rodríguez, R., Maycotte, C., & Acevedo, O. (2013). Estimación de biomasa y carbono almacenado en árboles de oyamel afectados por el fuego en el Parque Nacional “El Chico”, Hidalgo, México. *Madera y Bosques*, 19(2), 73-86. <https://doi.org/10.21829/myb.2013.192341>

Ribero, S. C., Soares, C. P. B., Fehrmann, F., Jacovine, L. A. G., & von Gadow, K. (2015). Above ground and below ground biomass and carbon estimates for clonal eucalyptus trees in southeast Brazil. *Revista Árvore*, 39(2), 353-363. <https://doi.org/10.1590/0100-67622015000200015>

Riofrío, J., Herrero de Aza, C., Grijalva, J., & Bravo, F. (2013). *Modelos para estimar la biomasa de especies forestales en sistemas agroforestales de la ecoregión andina del Ecuador*. Sociedad Española de Ciencias Forestales.

Rubilar, R. A., Lee Allen, H., & Kelting, D. 2005. Comparison of biomass and nutrient content equations for successive rotations of loblolly pine plantations on an Upper Coastal Plain Site. *Biomass and Bioenergy* 28, 548-564. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.12.001>

Rügnitz, M. T., Chacón, M. L., & Porro, R. (2009). *Guía para la determinación de carbono en pequeñas*

propiedades rurales. Centro Internacional de Investigación Agroforestal, Consorcio Iniciativa Amazónica.

Ruiz-Blandón, B.A., Hernández-Álvarez, E., Salcedo-Pérez, E., Rodríguez-Macías, R., Gallegos-Rodríguez, A., Valdés-Velarde, E., & Sánchez-Hernández, R. (2019). Almacenamiento de carbono y caracterización lignocelulósica de plantaciones comerciales de *Tectona grandis* L.f. en México. *Colombia Forestal*, 22(2), 15-29.

<https://doi.org/10.14483/2256201X.13874>

Scaramuzzino, R. L., D'Alfonso, C. O., Bardi, J. F., Gandini, M. L., & Lara, B. D. (2019). *Eucalyptus viminalis* Labill. (Myrtaceae): naturalizada en la República Argentina. *Darwiniana, Nueva Serie*, 7(2), 342-351.

<https://doi.org/10.14522/darwiniana.2019.72.843>

Seeberg, C. (2010). *Las posibilidades de financiación del carbono para la agricultura, la actividad forestal y otros proyectos de uso de la tierra en el contexto del pequeño agricultor*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

Segura, M., & Andrade, H. J. (2008). ¿Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes? *Agroforestería en las Américas*, 46, 89-96.

https://www.worldcocoafoundation.org/wp-content/uploads/files_mf/segura2008a.pdf

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) (2014). *Descarga de datos meteorológicos a nivel nacional: Estación San Marcos*. <https://www.senamhi.gob.pe/?p=descarga-datos-hidrometeorologicos>.

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) (2021). *Datos hidrometeorológicos en Cajamarca: Estación San Marcos*.

<https://www.senamhi.gob.pe/servicios/main.php?dp=cajamarca&p=estaciones>

Silva, C. E. (2012). *Evaluación de los ensayos de introducción de especies forestales y de mejoramiento genético en el departamento de Cajamarca* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria la Molina].

<https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/1686>

Soares, C. P. B., Neto, F. P., & Souza, A. L. (2011). *Den-drometria e inventario florestal*. Universidade Federal de Viçosa.

Soares, T. S., Leite, H. G., Do Vale, A. B., Soares, C. P. B., & Da Silva, G. F. (2007). Avaliação de um modelo de passo invariante na predição da estrutura de um povoamento de *Eucalyptus* sp. *Revista Árvore*, 31(2), 275-283.

<https://doi.org/10.1590/S0100-67622007000200010>

Vallejos, L., Álvarez, W., Paredes, M., Pinares, C., Bustíos, J., Vásquez, H., & García, R. (2020). Comportamiento productivo y valor nutricional de 22 genotipos de raigrás (*Lolium* spp.) en tres pisos altoandinos del norte de Perú. *Scientia Agropecuaria*, 11(4), 537-545.

<https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.04.09>

Vallejos, L., Álvarez, W., Paredes, M., Saldanha, S., Guillén, R., Pinares, C., Bustíos, J., & García, R. (2021). Comportamiento productivo y valor nutricional de siete genotipos de trébol en tres pisos altitudinales de la sierra norte del Perú. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 32(1), 1-12.

<http://dx.doi.org/10.15381/rivep.v32i1.17690>

Valverde, J., Barrena, V., & Guillén, R. (2019). Estimación de la biomasa aérea de *Eucalyptus globulus* Labill plantado en cercos vivos, distrito Huertas, Junín (Perú). *Revista Forestal del Perú*, 34(1), 52-65.

<http://dx.doi.org/10.21704/rfp.v34i1.1285>

Villar, M., Cuéllar, J., & Valentín, S. (2014). *Valoración técnica, económica y ambiental de tres sistemas de Silvopasturas en la región Cajamarca*. Instituto Nacional de Innovación Agraria.

<http://repositorio.inia.gob.pe/handle/20.500.12955/376>

Wei, T., Simko, V., & Wei, T. (2021). *Package corrplot. R package version 0.84*.

<https://cran.r-project.org/web/packages/corrplot/index.html>

