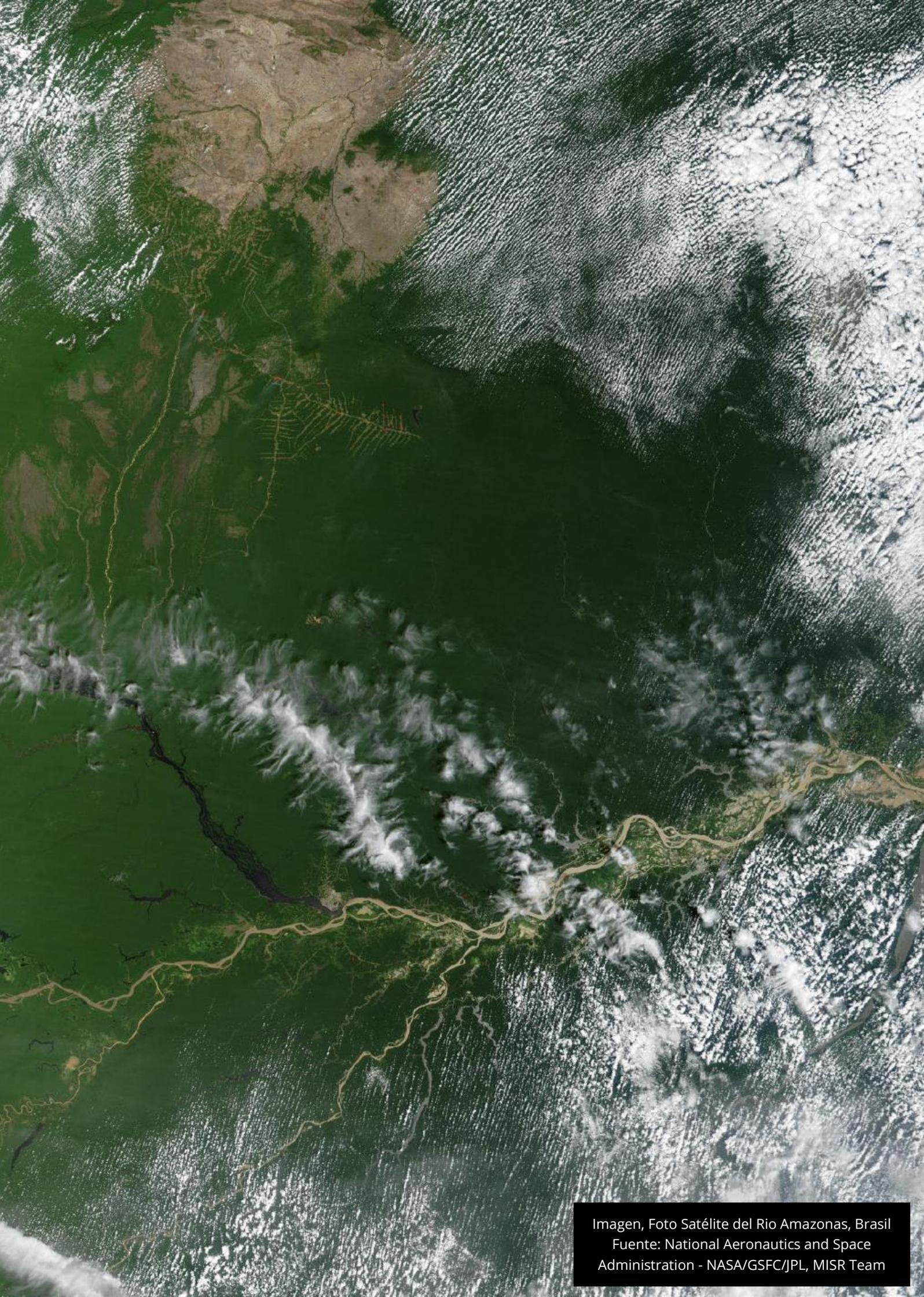


Boletín 4

ISSN 2411-6890



Imagen, Foto Satélite del Rio Amazonas, Brasil
Fuente: National Aeronautics and Space
Administration - NASA/GSFC/JPL, MISR Team

FACTORES QUE INFLUYEN EN LA ESTIMACIÓN DE BIOMASA AÉREA EN BOSQUES TROPICALES UTILIZANDO SENSORES REMOTOS DE RADAR

Victoria E. Espinoza-Mendoza

RESUMEN

A pesar de la gran cantidad de información espacial accesible, el tema de la estimación de la biomasa aérea mediante sensores remotos, especialmente de radar, sigue siendo un reto en ecosistemas complejos tales como los bosques tropicales. Una de las ventajas que poseen los sensores de radar es de "atravesar las nubes" (capacidad que no poseen imágenes ópticas como Landsat), facilitando su uso en áreas con permanente cobertura nubosa. Este trabajo pretende definir, a partir de diversos estudios realizados en bosques tropicales utilizando ALOS PALSAR, cuáles son los factores con mayor influencia sobre la señal del radar. Conocerlos es de utilidad en el desarrollo y/o mejora de metodologías para estimar la biomasa aérea en bosques tropicales combinando datos de campo e imágenes satelitales de radar.

PALABRAS CLAVE: *biomasa, radar, ALOS PALSAR, teledetección.*

DATOS DE LA AUTORA

Geógrafa de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Magister Scientiae (MSc.) en Manejo y Conservación de Bosques Tropicales y Biodiversidad del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza – CATIE en Costa Rica, gracias a la beca otorgada por el CGIAR Consortium Research Centre a través del programa Forests, Trees and Agroforestry del ICRAF – World Agroforestry Centre y la Cátedra de Ecología de CATIE.

Actualmente es Becaria Doctoral Latinoamericana del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) en Buenos Aires, Argentina.

© Este artículo es de acceso abierto sujeto a la licencia Reconocimiento 4.0 Internacional de *Creative Commons*. No se permite un uso comercial de la obra original ni la generación de obras derivadas. Para más información, visite: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

ABSTRACT

Despite the large amount of accessible spatial information, the issue of estimating aboveground biomass through remote sensing, especially radar, remains a challenge in complex ecosystems such as tropical forests. One of the advantages of radar sensors is that of "crossing clouds" (capacity that does not have optical images like Landsat), facilitating their use in areas with permanent cloud cover. This work defines, from several studies realized in tropical forests using ALOS PALSAR, which are the factors with the most influence on the signal of the radar. This can be useful in the development and/or improvement of methodologies to estimate aboveground biomass in tropical forests, combining field data and satellite imagery of radar.

KEYWORDS: biomass, radar, ALOS PALSAR, remote sensing, L-band.

© This article is of open access to the public and subject to the Creative Commons Attribution Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License. The commercial use of this original work and the production of derived works from this article is not allowed. For more information, please visit: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la estimación de biomasa aérea (AGB, por sus siglas en inglés) mediante la combinación de datos de campo y sensores remotos ha ido ganando terreno, debido a que se convierte en una opción que reduce costos, además de obtener información en zonas de difícil acceso (Koch 2013).

La biomasa es la cantidad total de material vegetal presente en un área específica (Drake et al. 2003). El componente aéreo del estrato arbóreo constituye uno de los principales almacenes de biomasa, por ende, de carbono (Quijano & Morales 2016). Existen diversos métodos para estimar AGB, siendo clasificados como destructivos o directos (cortar, secar y pesar el árbol) y no destructivos o indirectos (ecuaciones alométricas) (Sola et al. 2012; Walker 2011). Las ecuaciones alométricas suelen incluir tres variables: diámetro a la altura del pecho (DAP), altura del árbol y densidad de la madera; a través de las cuales podemos obtener la AGB estimada en campo.

La estimación de AGB utilizando sensores remotos sigue siendo un desafío, sobre todo en ecosistemas tan complejos como son los bosques tropicales (Hamdan et al. 2014b). Investigaciones realizadas por Avitabile et al. (2015), Baccini et al. (2012), Goetz et al. (2009) y Mitchard et al. (2013) utilizando imágenes ópticas y/o de radar muestran diferentes métodos utilizados para la estimación de AGB y stocks de carbono mediante sensores remotos en bosques tropicales alrededor del mundo. Resaltan, la capacidad que poseen las imágenes satelitales de radar tales como ALOS PALSAR para “traspasar las nubes” (capacidad con la que no cuentan las imágenes ópticas como LANDSAT), siendo esta característica muy útil en zonas tropicales con permanente cobertura nubosa.

A pesar de que existe poca información disponible que indique exactamente cuáles son los factores climáticos o biofísicos que afectan la estimación de AGB en bosques tropicales a escalas locales; estudios como los de Hamdan et al. (2014b), Sinha et al. (2015) y Espinoza- Mendoza (2016) aportan valiosa información. Tenemos que Hamdan et al. (2014b) encontraron en Malasia, que las ecuaciones alométricas poseen una gran influencia en la respuesta del sensor al momento de estimar biomasa. Además, el tamaño de los árboles y los grupos diamétricos también influenciaron sobre los valores de biomasa estimados mediante imágenes de radar. Por otro lado, Espinoza-Mendoza (2016), encontró en los bosques nicaragüenses, que la cantidad de árboles por hectárea es un factor muy importante al momento de correlacionar el valor de retrodispersión del radar con la biomasa estimada en campo.

El presente trabajo pretende definir, tomando como base diversos estudios realizados en bosques tropicales, qué factores son los que tendrían una mayor influencia al momento de estimar biomasa mediante imágenes de radar (especialmente ALOS PALSAR). Cabe resaltar que en esta investigación se mencionan factores referidos a aspectos técnicos y estructurales del bosque, centrándonos más en los últimos. Conocer estos factores y el nivel de influencia que poseen, sería de gran ayuda en el desarrollo y/o mejora de metodologías para estimar la biomasa aérea en bosques tropicales combinando datos de campo y sensores remotos.

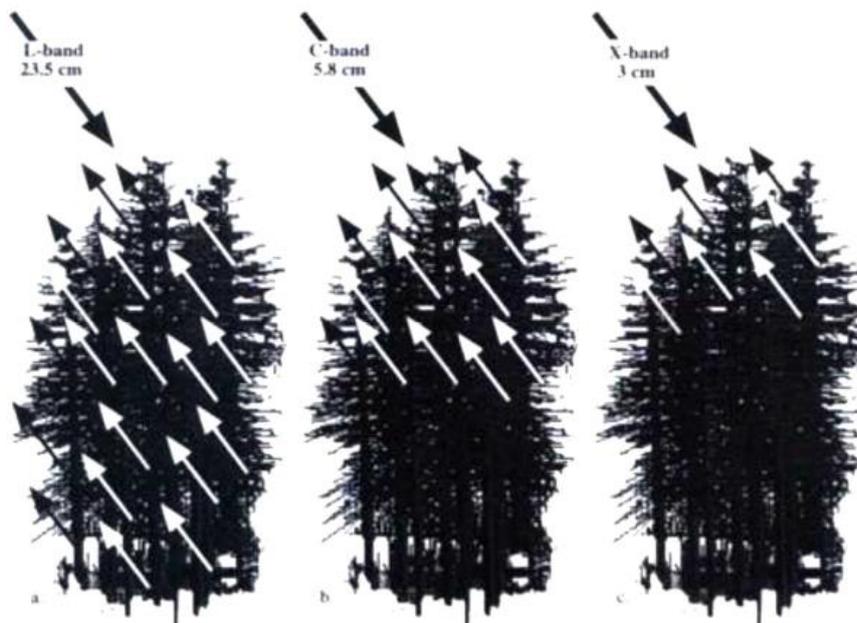
II. ASPECTOS TÉCNICOS DE LAS IMÁGENES DE RADAR: LONGITUD DE ONDA Y POLARIZACIÓN DE LA SEÑAL

La frecuencia del radar SAR es directamente proporcional a la profundidad de penetración de la onda, significando que ondas cortas solo podrán penetrar el bosque por unos pocos centímetros mientras que las ondas largas pueden interactuar con el suelo del bosque (Imhoff 1995). La banda L es la menos influenciada por las condiciones ambientales, por ende, obtiene mejor información de los componentes estructurales del bosque al contar con una mejor interacción con el tronco y las ramas, siendo la más adecuada para la estimación de biomasa (Ghasemi et al. 2011; Joshi et al. 2015b; Luckman et al. 1997; Yu and Saatchi 2016).

De la misma manera, la banda P, tiene una buena correspondencia con la biomasa. Ambas longitudes de onda larga pueden penetrar el dosel, dispersando la energía hacia los componentes leñosos, estando relacionadas a parámetros biofísicos de los árboles (Sinha et al. 2015; Yu and Saatchi 2016). Por otro lado, la banda X, es dispersada por las hojas y superficie del dosel, lo cual es factible para obtener acceso a la información de las capas superiores de los árboles. Mientras que la banda C penetra a través de las hojas siendo dispersada por pequeñas ramas y elementos del dosel intermedio (Ghasemi et al. 2011). La señal de esta última longitud, si bien es cierto traspasa hasta cierta medida el dosel, llega a atenuarse al entrar en contacto con doseles más cerrados y con mayor cantidad de componentes estructurales, por lo que funciona mejor sólo en coberturas con baja cantidad de biomasa (Ghasemi et al. 2011), siendo menos sensible al incremento de volumen de bosque que la banda L (Puliainen et al. 1999).

FIGURA 1.

Longitudes de onda. Las flechas indican la capacidad de penetración que poseen las bandas X, C y L a través del dosel (Jensen 2000).



Por otra parte, la polarización de la señal está referida a la dirección del campo eléctrico de las ondas electromagnéticas y depende de la interacción entre señales emitidas y los elementos reflectores

(Sinha et al. 2015). Las señales de radar se emiten en cuatro combinaciones de polarización: horizontal (HH), vertical (VV) o cruzada (HV, VH) (Ghasemi et al. 2011). Todos estos tipos de polarización se verán influenciados por la estructura vertical y/o horizontal de los bosques; por lo que van a interactuar con distintas orientaciones y estructuras de sus componentes.

Diversos estudios han demostrado la superioridad de la polarización HV sobre la polarización HH, indicando que HV posee una mayor sensibilidad con la biomasa, siendo menos influenciada por la humedad del suelo y de la vegetación (Behera et al. 2016; Collins et al. 2009; Hamdan et al. 2011; Michelakis et al. 2015; Sandberg et al. 2011; Van Zyl 1993). Al contrario, estudios como los de Wang et al. (1995) indican que la polarización HH puede proveer un medio de estimación de biomasa bastante bueno en bosque de coníferas. Esta polarización interactúa de una mejor forma con el tronco y la biomasa del dosel (Beaudoin et al. 1994), presentándose una relación directa superficie-tronco (Wang et al. 1995).

Finalmente consideramos que las bandas de longitudes largas como L o P, con polarizaciones cruzadas como HV o VH arrojan mejores resultados que las bandas de onda corta tales como C o X con polarizaciones simples HH o VV (Dobson et al. 1992; Le Toan et al. 1992).

III. ALOMETRÍA

La alometría es uno de los factores relacionados a los parámetros del bosque más importantes a tomar en cuenta, probablemente muy por encima de la elaboración del modelo de biomasa. El uso de ecuaciones alométricas que consideren tres parámetros básicos: diámetro a la altura del pecho (DAP), altura del árbol y densidad de madera de la especie, puede brindarnos estimaciones más precisas.

Debido a que en algunas ocasiones la presencia de sesgos es inevitable por errores en las mediciones de estos parámetros en campo, debemos considerar evaluar el uso de cada uno de ellos (Keller et al. 2001; Ketterings et al. 2001). Para esto, es clave tomar en cuenta la metodología utilizada para su cálculo. Si no conocemos la metodología, dudamos de esta u observamos inconsistencias, como por ejemplo la falta de uso de instrumentos especializados para medir las alturas; lo más recomendable sería utilizar ecuaciones que sólo consideren DAP, ya que nuestros resultados podrían estar sobre o sub-estimando la biomasa en campo y por ende los resultados del modelo.

Consideraremos que el uso de ecuaciones desarrolladas localmente para determinado tipo de bosque o especie puede brindarnos una estimación más precisa. Pero si este no fuera el caso, ecuaciones genéricas como las de Chave et al. (2014b), Brown (1997) updated by Pearson et al. (2005), Feldpausch et al. (2006), entre otras, brindan excelentes estimaciones considerando los parámetros indicados (Tabla 1).

Por ejemplo, Hamdan et al. (2014a) utilizaron cinco ecuaciones alométricas, determinando que la que mejor correlación con la señal de radar fue la ecuación alométrica de Kato et al. (1978). Mientras que Espinoza-Mendoza (2016) trabajó con las ecuaciones de Brown (1997) updated by Pearson et al. (2005) desarrollada para bosques tropicales y de Chave et al. (2001); ambas ecuaciones sólo consideran el parámetro de DAP. En el caso de Espinoza-Mendoza (2016) no se encontraron diferencias estadísticas significativas entre ambas ecuaciones por lo que se decidió utilizar la ecuación de Brown (1997) updated by Pearson et al. (2005).

TABLA 1.

Diversidad de ecuaciones alométricas a ser consideradas para la estimación de biomasa utilizando datos tomados en campo (Elaboración propia).

Referencia	Modelo alométrico
Chave et al. (2005)	$\rho X \exp(\alpha + \beta_1 (\ln(DAP))) + \beta_2 (\ln(DAP))^2 - \beta_3 (\ln(DAP))^3$
Chave et al. (2014a)	$\ln(AGB) = \alpha + \beta \ln(\rho * D^2 * H) + \varepsilon$
Brown (1997) Seco pp=900-1500mm	$B = 0.2035 * DAP^{2.3196}$
Brown (1997) Húmedo pp=1500-4000mm	$B = \exp(-2.289 + 2.649 * \ln(DAP) - 0.021 * \ln(DAP)^2)$
Brown (1997) Muy Húmedo (pp > 4000mm)	$B = 21.297 - 6.953 * DAP + 0.740 * DAP^2$
Chambers et al.(2001)	$B = \exp(\alpha + \beta_1 \ln(DAP) + \beta_2 (\ln(DAP))^2 - \beta_3 (\ln(DAP))^3)$
Burger (2005)	$B = \exp(\alpha + \beta_1 \ln(Dbase))$
Tiepolo et al. (2002)	$B = \alpha + \beta_1(DAP) + \beta_2(DAP)^2$
Feldspausch (2012)	$B = \exp(\alpha + b \ln(DAP) + c(\ln(DAP))^2 - d(\ln(DAP))^3 + e \ln(\rho w))$

IV.- ASPECTOS DE LA ESTRUCTURA DEL BOSQUE: DENSIDAD, HETEROGENEIDAD, GRUPOS DIAMÉTRICOS Y TIPOS DE DISPERSIÓN EN BOSQUES

Existen estudios utilizando sensores remotos de radar que han estimado biomasa en bosques tropicales. La mayoría de estos se han llevado a cabo en bosques de coníferas y sabanas de pino, justificando que el sensor no puede ser utilizado en bosques tropicales densos o en bosques con biomasa mayor a 100 Mg ha⁻¹ (Mermoz et al. 2014b; Mitchard et al. 2009; Woodhouse et al. 2012). Por lo que se considera que la densidad y la complejidad estructural de algunos tipos de bosque pueden tener una gran influencia sobre la banda L de ALOS PALSAR (Michelakis et al. 2015). El trabajo que realizó Espinoza-Mendoza (2016), (pionero en Nicaragua, y uno de los primeros en Centroamérica en discutir el rol de los factores que impactan sobre la estimación de biomasa con radar) en los bosques latifoliados y de coníferas en Nicaragua, encontró una gran diferencia al correlacionar ambos tipos de bosque con la señal de radar. El estudio mostró que el bosque de coníferas correlacionó bastante bien (n=40; rp=0.64; pvalue<0.0001), mientras que el bosque latifoliado obtuvo una baja correlación, la cual sólo mejoró al considerar > 80ind por parcela de 0.5ha (160 ind/ha) (n=34; rp=0.60; pvalue<0.0002).

Observando estos resultados, consideramos que la estructura de ambos bosques sería una de las causas. Esto puede ser avalado por Michelakis et al. (2015) quienes mencionan que, en ocasiones,

las débiles relaciones entre el coeficiente de retrodispersión y la biomasa se deben a la variación estructural del dosel y al número de árboles presentes en las parcelas. Por ende, discutiremos el comportamiento de la señal de radar de manera separada para bosque de coníferas y bosques latifoliados.

Un bosque de coníferas estructuralmente es menos complejo que un bosque latifoliado (Figura 2). Las áreas en donde se ubican estos bosques son más abiertas, contando con una baja cobertura de dosel y la presencia de claros y/o vacíos en el terreno. Por lo cual, a menor complejidad, la señal de radar debería ser dispersada de forma más homogénea sin la influencia de una variedad de elementos dispersores.

Podemos considerar que, en un bosque de coníferas, el tipo de dispersión dominante sería de doble rebote (Figura 4), debido a que, al existir suelo expuesto, la señal es emitida hacia el suelo, rebota en el tronco y luego se dispersa hacia el radar, mejorando la sensibilidad de este (Hensley et al. 2014). Además, en algunas zonas, los bosques de coníferas no son muy densos, por lo cual la banda L tendría una contribución positiva (Yu and Saatchi 2016).

Wang et al. (1995) indican que la mayor cantidad de biomasa de un árbol de conífera está almacenada en su tronco. Por lo que se puede deducir que al existir la dispersión de doble rebote con interacción superficie – tronco, la señal de radar estaría captando información directa del componente con mayor biomasa (tronco). Por otro lado, la dispersión volumétrica (Figura 4) en este tipo de bosque es muy pequeña, la cual no aportaría significativamente en los resultados de la correlación.

La homogeneidad presente en los bosques de coníferas no es una característica principal de un bosque latifoliado tropical, ya que en este existe diversidad de especies, considerándoseles como bosques heterogéneos (Figura 3). La alta variabilidad en sus componentes: troncos, ramas, formas de hojas, alturas, densidades, frutos y/o semillas, diversos contenidos de humedad, entre otros, influiría positiva o negativamente en la respuesta del radar.

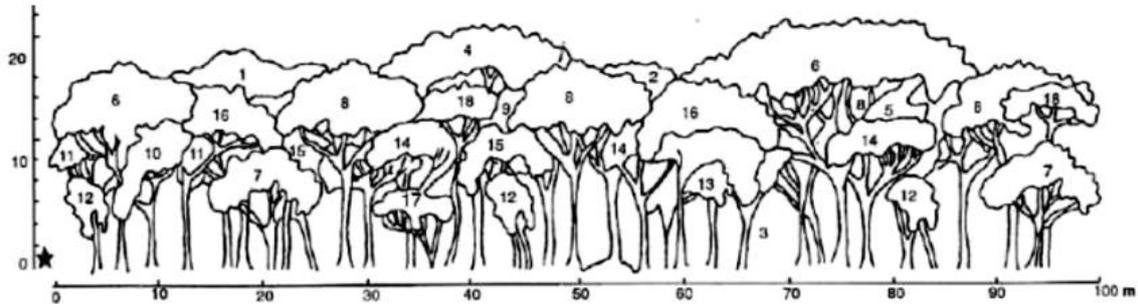
FIGURA 2.

Esquema de bosques de coníferas maduros. Se observa un perfil en (a) bastante denso y homogéneo, representando un bosque de coníferas en el cual predomina una especie. Mientras que (b) muestra un bosque de coníferas con múltiples estratos, con diferentes estadios de crecimiento, menos denso que (a), con mayor variabilidad en alturas y en donde estarían predominando entre 2 o 3 especies de pino. Aun así, se observa que sus estructuras poseen una mayor homogeneidad que un bosque latifoliado.



FIGURA 3.

Tomado de Louman (2001). El esquema muestra el perfil idealizado de un bosque húmedo premontano transición a tropical (Holdridge and Grenke 1971). Se observa variedad de alturas, formas de tronco, dosel, ramas y cada número representa una especie diferente.



El tipo de dispersión presente en bosques latifoliados es variable (Figura 4). La dispersión de tipo volumétrica favorece la retrodispersión directa tanto del suelo, tronco y copa (De Miguel and Gutiérrez 2000; Watanabe et al. 2006). Si nuestro bosque latifoliado fuese homogéneo, es muy probable que no existan diferencias marcadas entre correlaciones con bosques ralos y densos, tal como sucedió en el estudio de Espinoza-Mendoza (2016), pero este no es el caso. Por lo que se hace necesario considerar una distinción en la respuesta del radar en bosques latifoliados ralos y bosques latifoliados densos.

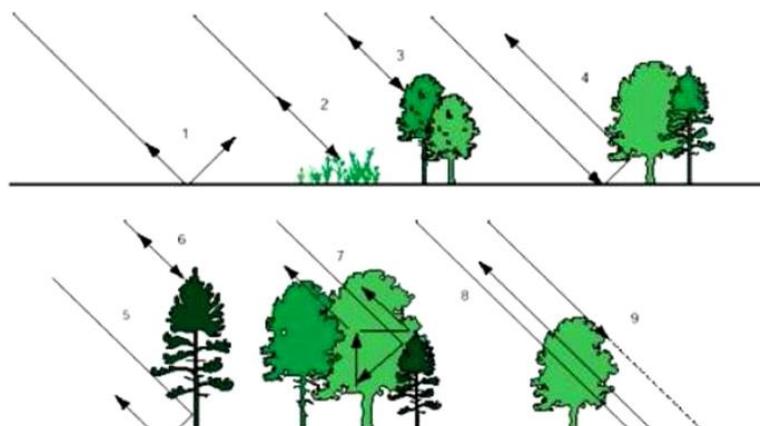
La dispersión de tipo doble rebote podría ocurrir en un bosque latifoliado ralo o muy ralo, por la existencia de vacíos en el terreno con suelo expuesto. Si consideramos algunos de estos bosques ralos como bosques en estadios sucesionales tempranos, según Mermoz et al. (2014b) la biomasa estaría siendo sobreestimada.

En bosques latifoliados densos, predominará la dispersión volumétrica, la cual obtendrá información de todos los componentes presentes en las capas medias e inferiores del dosel, la señal iría atenuándose al llegar al suelo debido a la densidad de este bosque (Joshi et al.

2015a). Unido a esto, los bosques latifoliados muy densos, usualmente son bosques maduros, en donde la señal de radar cuenta con una mejor correspondencia que en bosques más jóvenes (Mermoz et al. 2014a).

FIGURA 4.

Distintos tipos de dispersión presentes en un bosque (Piwowar, 1997) (1) Dispersión difusa desde la superficie (2) y (3) Dispersión directa de diversos componentes de la vegetación (4) Dispersión doble rebote de la interacción suelo - vegetación (5)



Reflexión de esquina entre tronco y superficie (6) Retrodispersión directa de la capa superior del dosel (7) Dispersión volumétrica desde dentro del dosel (8) Dispersión difusa desde la superficie (9) Sombras causadas por partes del dosel del bosque u otras partes del dosel y/o de la superficie.

Los grupos diamétricos también cumplen un factor importante para lograr una buena correlación entre la biomasa estimada en campo y el coeficiente de retrodispersión. Por ejemplo, el estudio de Hamdan et al. (2014b) mostró que los DAP > 30 cm obtuvieron una mejor correspondencia con la señal de radar en bosques de Malasia. Estos bosques son dominados por dipterocárpeos de tierras bajas, presentes en áreas dedicadas a la producción de madera con actividades de tala desde los '70s. Espinoza-Mendoza (2016) encontró que al considerar la biomasa de individuos > 10cm se obtuvo la mejor correlación para bosques latifoliados y de coníferas a lo largo de siete municipios en la región central y nororiental de Nicaragua, en zonas donde hipotéticamente estaría ocurriendo una transición forestal (Tabla 2).

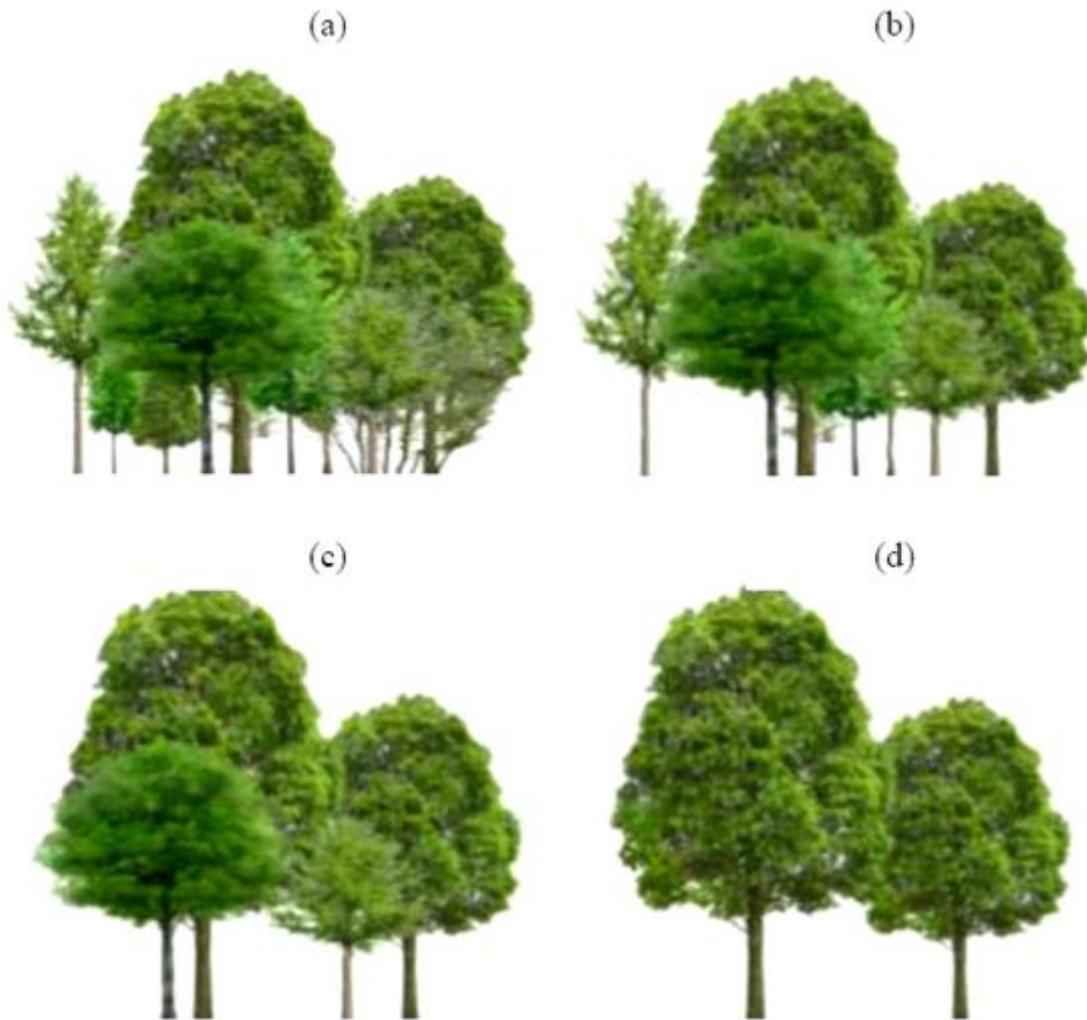
TABLA 2.

Correlaciones entre la biomasa presente en diversos grupos diamétricos y la señal de radar (Espinoza-Mendoza 2016).

DAP	Pearson	# de parcelas
≥10cm	0.74(p<0.0001)	74
>20cm	0.73(p<0.0001)	72
>30cm	0.67(p<0.0001)	65
≥40cm	0.57(p<0.0001)	53
≥50cm	0.50(p<0.0001)	46
>60cm	0.34(p<0.1100)	34
>70cm	0.13(p<0.5351)	26

A través de la figura 5 podríamos explicar algunos factores como el de los grupos diamétricos: (a) estaría representando un bosque latifoliado muy denso (sin claros o vacíos en el terreno) que considera biomasa de árboles con DAP > 10cm, con una gran variabilidad en alturas y componentes. La señal de radar en este tipo de bosque sería dispersada volumétricamente atenuándose conforme penetra el dosel hacia capas más cercanas al suelo, (b) representa un bosque latifoliado denso incluyendo biomasa de individuos con DAP > 30cm, al igual que en (a) las alturas y componentes poseen cierto grado de variabilidad. Manteniéndose una buena correlación, (c) representa un bosque latifoliado considerando sólo la biomasa de individuos con DAP > 50cm, en el cual se puede generar no sólo una dispersión volumétrica, sino también una dispersión doble rebote. Se observa en la tabla 2 que la correlación decrece notablemente. Finalmente (d) representa un bosque latifoliado donde sólo se considera la biomasa de árboles con DAP > 70cm, probablemente árboles de gran altura, indicando que no existe correlación con la señal de radar (Tabla 2), indicando que la señal interactúa fuertemente con los componentes de capas medias e inferiores, demostrando para este caso que no son los árboles de mayor tamaño los que influyen la señal de radar.

FIGURA 5.
Estructura del bosque y biomasa (Espinoza-Mendoza 2016).

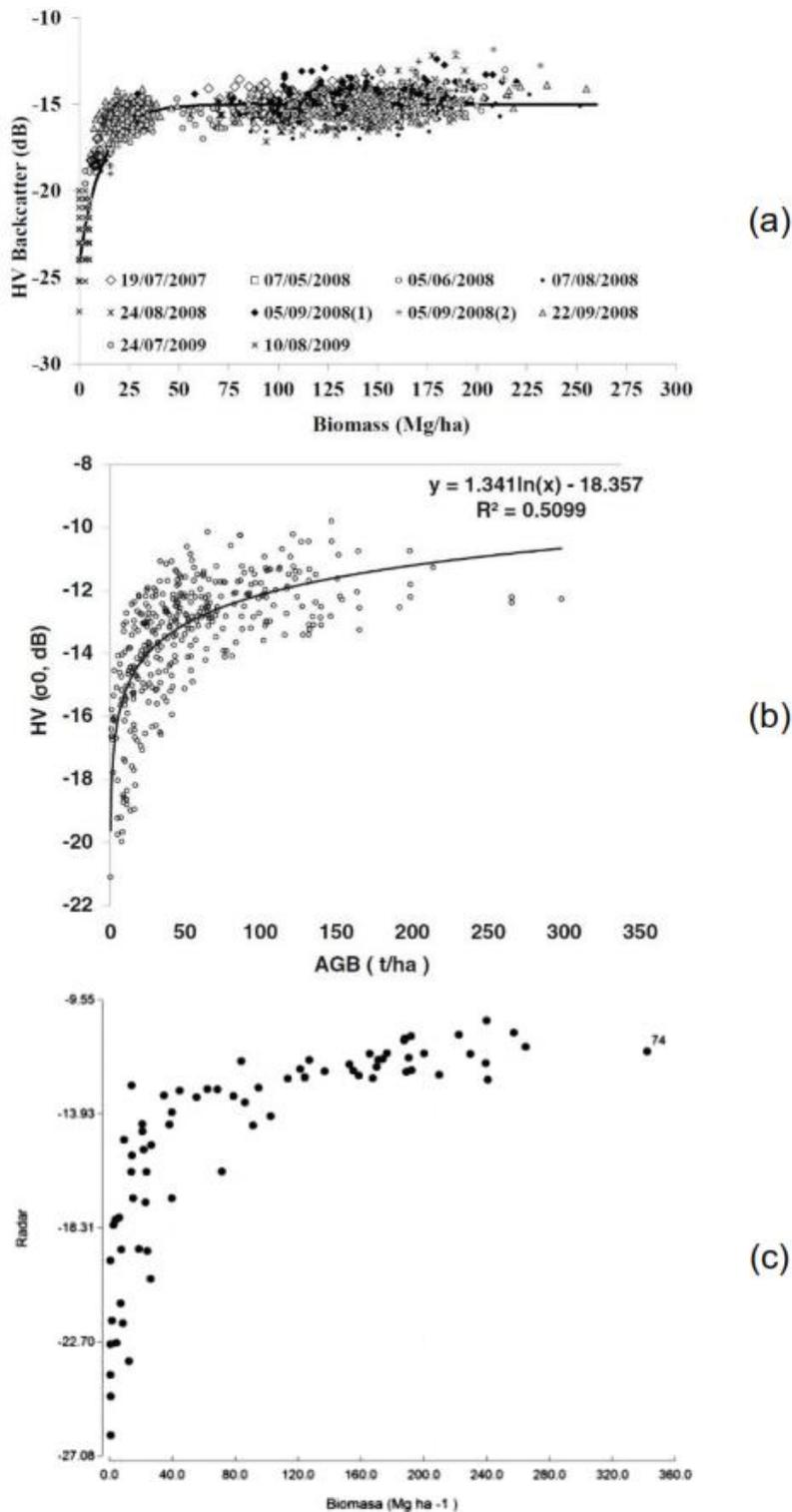


V. NIVEL DE SATURACIÓN

Uno de los grandes problemas que se presenta con las imágenes de radar es la saturación de la señal. Ghasemi et al. (2011) consideran que la señal de radar en bosques tropicales complejos en bandas L y P se satura alrededor de las 100 Mg ha⁻¹. Contrariamente a lo que indican Le Toan et al. (2011); Saatchi et al. (2011) y Sandberg et al. (2011) en donde consideran que la banda P estaría saturándose a partir de las 300 Mg ha⁻¹. En áreas consideradas de estructura simple y en donde existen entre 1 a 2 especies la saturación puede ocurrir alrededor de las 250 Mg ha⁻¹. Por otro lado, Watanabe et al. (2006) indican que el nivel de saturación para una sola especie de conífera utilizando la polarización HH fue de 200 Mg ha⁻¹, mientras que si se incluyen variedad de especies (bosque heterogéneo) la saturación puede variar dependiendo de la polarización: VV=50 tn/ha, HH=100 tn/ha y HV= >100 tn/ha. Como se observa, existen distintos niveles de saturación, los cuales dependerán en gran medida del tipo de polarización usada, longitudes de onda, tipos y estructuras de bosques y número de especies (Figura 6).

FIGURA 6.

Distintos niveles de saturación. Biomasa estimada en campo vs HV. a: Baghdadi et al. (2015) alrededor de las 60 Mg ha⁻¹ en plantaciones de eucalipto en Brasil en polarización HV; b: Thumaty et al. (2016), mayor a 150 Mg ha⁻¹ en polarización HV en bosques deciduos en la India; c: Espinoza-Mendoza (2016), alrededor de las 130 Mg ha⁻¹ en bosques nicaragüenses.



VI. ENMASCARAMIENTO DE ÁREAS DE BOSQUE Y NO BOSQUE

Este factor, si bien es cierto, no influye directamente al momento de desarrollar un modelo, sí puede tener un fuerte impacto al considerarse como un recurso externo. Al existir mapas de cobertura y uso de suelo elaborados con distintas metodologías, muchas áreas consideradas bosque pueden no serlo en la realidad. Morton et al. (2014) consideran que estos recursos externos causarían un impacto en los valores de biomasa estimada. Es por esto por lo que para mitigar en cierta medida esta clase de fuente de error, podremos valernos de una revisión visual de las parcelas de donde se obtuvieron los datos para estimar la biomasa en campo. Apoyándonos en herramientas como Google Earth, fichas técnicas de campo utilizadas al momento del levantamiento de información de las parcelas, mapas forestales y/o imágenes multiespectrales de alta resolución que correspondan a fechas cercanas de la toma de datos.

1. Para estimar biomasa en bosques tropicales utilizando sensores remotos de radar deberán tomarse en cuenta las características estructurales de estos. Debido a que la señal de radar, especialmente las bandas L y P actúan de forma directa con los componentes de la vegetación presente en estos bosques.
2. Se deberán desarrollar ecuaciones específicas para cada tipo de bosque. Si en un paisaje contamos con: bosque latifoliado, bosque de coníferas, bosque ribereño y bosque de manglar, el mejor método para obtener buenos resultados partirá del desarrollo de modelos puntuales para cada tipo de bosque, tomando en cuenta sus componentes estructurales.
3. Metodologías elaboradas de forma genérica, pueden causar grandes variaciones en la biomasa estimada, al no considerar parámetros del bosque referidos a áreas locales.
4. Generar más información relacionada a los factores que afectan la estimación de biomasa en bosques tropicales utilizando sensores remotos de radar es clave para conocer cómo la estructura de los bosques tropicales, la cual es altamente compleja, afecta las distintas bandas, polarizaciones y señales dispersadas por los componentes del bosque.
5. Analizar y comparar el comportamiento multitemporal de la señal de radar entre bosques tropicales y sistemas agroforestales en los trópicos, es clave para generar información relacionada a procesos de transiciones forestales.

VIII. AGRADECIMIENTOS

Parte de algunos resultados presentados en esta investigación, se obtuvieron en la tesis desarrollada por la autora en el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza – CATIE para optar por el grado de MSc., financiada por Centro Mundial de Agroforestería – ICRAF y CATIE, en el país de Nicaragua utilizando datos brindados por el Instituto Nacional Forestal de Nicaragua - INAFOR. Por tal motivo, se agradece a las instituciones mencionadas por el apoyo académico, financiero e información técnica brindada.

IX. BIBLIOGRAFÍA

- Avitabile, V., Herold, M., Heuvelink, G., Lewis, S., Phillips, O., Asner, G., Armston, J., Asthon, P., Banin, L., & Bayol, N. (2015). *An integrated pan-tropical biomass map using multiple reference datasets*. *Global Change Biology*, 22, 1406–1420.
- Baccini, A., Goetz, S., Walker, W., Laporte, N., Sun, M., SullaMenashe, D., Hackler, J., Beck, P., Dubayah, R., & Friedl, M. (2012). *Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps*. *Nature Climate Change*, 2, 182-185.
- Baghdadi, N., Le Maire, G., Bailly, J.-S., Osé, K., Nouvellon, Y., Zribi, M., Lemos, C., & Hakamada, R. (2015). *Evaluation of ALOS/PALSAR L-band data for the estimation of Eucalyptus plantations aboveground biomass in Brazil*. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8, 3802-3811.
- Beaudoin, A., Le Toan, T., Goze, S., Nezry, E., Lopes, A., Mougín, E., Hsu, C., Han, H., Kong, J., & Shin, R. (1994). *Retrieval of forest biomass from SAR data*. *International Journal of Remote Sensing*, 15, 2777-2796.
- Behera, M., Tripathi, P., Mishra, B., Kumar, S., Chitale, V., & Behera, S.K. (2016). *Above-ground biomass and carbon estimates of Shorea robusta and Tectona grandis forests using QuadPOL ALOS PALSAR data*. *Advances in Space Research*, 57, 552-561.
- Brown, S. (1997). *Estimating biomass and biomass change of tropical forests*. (134 ed.). Roma, Italia: Food & Agriculture Org.
- Collins, J., Hutley, L.B., Williams, R., Boggs, G., Bell, D., & Bartolo, R. (2009). *Estimating landscape-scale vegetation carbon stocks using airborne multi-frequency polarimetric synthetic aperture radar (SAR) in the savannahs of north Australia*. *International Journal of Remote Sensing*, 30, 1141-1159
- Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M., Chambers, J., Eamus, D., Fölster, H., Fromard, F., Higuchi, N., & Kira, T. (2005). *Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests*. *Oecologia*, 145, 87-99.
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M.S., Delitti, W.B., Duque, A., Eid, T., Fearnside, P.M., & Goodman, R.C. (2014a). *Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees*. *Global Change Biology*, 20, 3177-3190.
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M.S., Delitti, W.B.C., Duque, A., Eid, T., Fearnside, P.M., & Goodman, R.C. (2014b). *Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees*. *Global Change Biology*, 20, 3177-3190.
- Chave, J., Riéra, B., & Dubois, M.-A. (2001). *Estimation of biomass in a neotropical forest of French Guiana: spatial and temporal variability*. *Journal of Tropical Ecology*, 17, 79-96.
- De Miguel, S.M., & Gutiérrez, J.S. (2000). *Estimación de biomasa en masas regulares por medio de imágenes de radar*. In *Ciencia y tecnología de la información geográfica en un mundo globalizado: X Congreso del Grupo de Métodos Cuantitativos, Sistemas de Información Geográfica y Teledetección* (p. 47).

- Dobson, M.C., Ulaby, F.T., LeToan, T., Beaudoin, A., Kasischke, E.S., & Christensen, N. (1992). *Dependence of radar backscatter on coniferous forest biomass*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 30, 412-415.
- Drake, J.B., Knox, R.G., Dubayah, R.O., Clark, D.B., Condit, R., Blair, J.B., & Hofton, M. (2003). *Above-ground biomass estimation in closed canopy neotropical forests using lidar remote sensing: factors affecting the generality of relationships*. Global Ecology and Biogeography, 12, 147-159.
- Espinoza-Mendoza, V.E. (2016). *Impulsores de cambio en el uso de suelo y almacenamiento de carbono sobre un gradiente de modificación humana de Paisajes en Nicaragua*. In (p. 170). Turrialba, Costa Rica: CATIE.
- Feldpausch, T.R., McDonald, A.J., Passos, C.A., Lehmann, J., & Riha, S.J. (2006). *Biomass, harvestable area, and forest structure estimated from commercial timber inventories and remotely sensed imagery in southern Amazonia*. Forest Ecology and Management, 233, 121-132
- Ghasemi, N., Sahebi, M.R., & Mohammadzadeh, A. (2011). *A review on biomass estimation methods using synthetic aperture radar data*. International Journal of Geomatics and Geosciences, 1, 776-788
- Goetz, S.J., Baccini, A., Laporte, N.T., Johns, T., Walker, W., Kellndorfer, J., Houghton, R.A., & Sun, M. (2009). *Mapping and monitoring carbon stocks with satellite observations: a comparison of methods*. Carbon Balance and Management, 4, 2
- Hamdan, O., Aziz, H.K., & Rahman, K.A. (2011). *Remotely sensed L-Band SAR data for tropical forest biomass estimation*. Journal of Tropical Forest Science, 23, 318-327
- Hamdan, O., Khali Aziz, H., & Mohd Hasmadi, I. (2014a). *L-band ALOS PALSAR for biomass estimation of Matang Mangroves, Malaysia*. Remote Sensing of Environment, 155, 69-78
- Hamdan, O., Mohd Hasmadi, I., HKhali Aziz, H., Norizah, K., & Hlmi Zuhaidi, M.S. (2014b). *Factors Affecting L-Band Alos Palsar Backscatter on Tropical Forest Biomass*. Global Journal of Science Frontier Research, 14, 51-63
- Hensley, S., Oveisgharan, S., Saatchi, S., Simard, M., Ahmed, R., & Haddad, Z. (2014). *An error model for biomass estimates derived from polarimetric radar backscatter*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 52, 4065-4082
- Holdridge, L.R., & Grenke, W.C. (1971). *Forest environments in tropical life zones: a pilot study*. Forest environments in tropical life zones: a pilot study.
- Imhoff, M. (1995). *Radar backscatter and biomass saturation: ramifications for global biomass inventory*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 33, 511-518.
- Joshi, N.P., Mitchard, E.T., Schumacher, J., Johannsen, V.K., Saatchi, S., & Fensholt, R. (2015a). *L-Band SAR Backscatter Related to Forest Cover, Height and Aboveground Biomass at Multiple Spatial Scales across Denmark*. Remote Sensing, 7, 4442- 4472.
- Joshi, N.P., Mitchard, E.T.A., Schumacher, J., Johannsen, V.K., Saatchi, S., & Fensholt, R. (2015b). *L-band SAR backscatter related to forest cover, height and aboveground biomass at multiple spatial scales across Denmark*. Remote Sensing, 7, 4442- 4472

- Kato, R., Tadaki, Y., & Ogawa, H. (1978). *Plant biomass and growth increment studies in Pasoh Forest*. Malayan Nature Journal.
- Keller, M., Palace, M., & Hurtt, G. (2001). *Biomass estimation in the Tapajos National Forest, Brazil: examination of sampling and allometric uncertainties*. *Forest Ecology and Management*, 154, 371-382.
- Ketterings, Q.M., Coe, R., van Noordwijk, M., & Palm, C.A. (2001). *Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forests*. *Forest Ecology and Management*, 146, 199-209
- Koch, B. (2013). *Remote Sensing supporting national forest inventories NFA*. FAO knowledge reference for national forest assessments, 15
- Le Toan, T., Beaudoin, A., Riom, J., & Guyon, D. (1992). *Relating forest biomass to SAR data*. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 30, 403-411
- Le Toan, T., Quegan, S., Davidson, M., Balzter, H., Paillou, P., Papathanassiou, K., Plummer, S., Rocca, F., Saatchi, S., & Shugart, H. (2011). *The BIOMASS mission: Mapping global forest biomass to better understand the terrestrial carbon cycle*. *Remote Sensing of Environment*, 115, 2850-2860
- Louman, B. (2001). *Silvicultura de bosques latifoliados húmedos con énfasis en América Central*. CATIE.
- Luckman, A., Baker, J., Kuplich, T.M., Yanasse, C.d.C.F., & Frery, A.C. (1997). *A study of the relationship between radar backscatter and regenerating tropical forest biomass for spaceborne SAR instruments*. *Remote Sensing of Environment*, 60, 1-13
- Mermoz, S., Le Toan, T., Villard, L., Réjou-Méchain, M., & SeifertGranzin, J. (2014a). *Biomass assessment in the Cameroon savanna using Alos Palsar data*. *Remote Sensing of Environment*, 155, 109-119
- Mermoz, S., Rejou-Mechain, M., Villard, L., Le Toan, T., Rossi, V., & Gourlet-Fleury, S. (2014b). *Biomass of dense forests related to L-band SAR backscatter? In Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2014 IEEE International* (pp. 1037-1040)
- Michelakis, Stuart, Brolly, Lopez, & Linares. (2015). *Estimation of Woody Biomass of Pine Savanna Woodlands from Alos Palsar Imagery*. *Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing*, 8, 244-254
- Mitchard, E., Saatchi, S., Gerard, F., Lewis, S., & Meir, P. (2009). *Measuring woody encroachment along a forest-savanna boundary in Central Africa*. *Earth Interactions*, 13, 1-29
- Mitchard, E.T., Meir, P., Ryan, C.M., Woollen, E.S., Williams, M., Goodman, L.E., Mucavele, J.A., Watts, P., Woodhouse, I.H., & Saatchi, S.S. (2013). *A novel application of satellite radar data: measuring carbon sequestration and detecting degradation in a community forestry project in Mozambique*. *Plant Ecology & Diversity*, 6, 159-170
- Morton, D.C., Nagol, J., Carabajal, C.C., Rosette, J., Palace, M., Cook, B.D., Vermote, E.F., Harding, D.J., & North, P.R. (2014). *Amazon forests maintain consistent canopy structure and greenness during the dry season*. *Nature*, 506, 221-224
- Pearson, T., Walker, S., & Brown, S. (2005). *Sourcebook for land use, land-use change and forestry projects*. Winrock International.

- Pulliaainen, J., Kurvonen, L., and Hallikainen, M. T. (1999). *Multitemporal behavior of L-and C-band SAR observations of boreal forests*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 37(2), 927-937.
- Quijano, A. & Morales, Y. (2016). *Modelo regresivo para la estimación de biomasa aérea forestal a partir de datos de parcelas permanentes y datos Radar SAR ALOS PALSAR en el Parque Natural Bataclán, Cali*. UD y la Geomática, 11, 66-72.
- Saatchi, S.S., Harris, N.L., Brown, S., Lefsky, M., Mitchard, E.T., Salas, W., Zutta, B.R., Buermann, W., Lewis, S.L., & Hagen, S. (2011). *Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents*. In, Proceedings of the National Academy of Sciences (pp. 9899-9904)
- Sandberg, G., Ulander, L.M., Fransson, J., Holmgren, J., & Le Toan, T. (2011). *L-and P-band backscatter intensity for biomass retrieval in hemiboreal forest*. Remote Sensing of Environment, 115, 2874-2886
- Sinha, S., Jeganathan, C., Sharma, L., & Nathawat, M. (2015). *A review of radar remote sensing for biomass estimation*. International Journal of Environmental Science and Technology, 12, 1779-1792
- Sola, G., Picard, N., Saint-André, L., & Henry, M. (2012). *Resumen del manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles: del trabajo de campo a la predicción*. Roma, Montpellier: Las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y el Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
- Thumaty, K.C., Fararoda, R., Middinti, S., Gopalakrishnan, R., Jha, C.S., & Dadhwal, V.K. (2016). *Estimation of Above Ground Biomass for Central Indian Deciduous Forests Using ALOS PALSAR L-Band Data*. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 44, 31-39
- Van Zyl, J.J. (1993). *The effect of topography on radar scattering from vegetated areas*. Geoscience and Remote Sensing, 31, 153- 160
- Walker, W., A. Baccini, M. Nepstad, N. Horning, D. Knight, E. Braun, y A. Bausch. (2011). *Guía de Campo para la Estimación de Biomasa y Carbono Forestal*. Versión 1.0. Falmouth, Massachusetts, USA.: Woods Hole Research Center
- Wang, Y., Davis, F., Melack, J., Kasischke, E., & Christensen Jr, N. (1995). *The effects of changes in forest biomass on radar backscatter from tree canopies*. Remote Sensing, 16, 503-513
- Watanabe, M., Shimada, M., Rosenqvist, A., Tadono, T., Matsuoka, M., Romshoo, S.A., Ohta, K., Furuta, R., Nakamura, K., & Moriyama, T. (2006). *Forest Structure Dependency of the Relation Between L-Band and Biophysical Parameters*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 44, 3154-3165
- Woodhouse, I.H., Mitchard, E.T., Brolly, M., Maniatis, D., & Ryan, C.M. (2012). *Radar backscatter is not a direct measure of forest biomass*. Nature Climate Change, 2, 556-557
- Yu, Y., & Saatchi, S. (2016). *Sensitivity of L-Band SAR Backscatter to Aboveground Biomass of Global Forests*. Remote Sensing, 8, 522.