

**The estimation of aerial biomass and structural parameters of mangroves in Laguna Pom Atasta, Campeche and Laguna Agua Brava, Nayarit, Mexico, using ALOS PALSAR radar images**

Alma Delia Vázquez Lule<sup>1\*</sup>  
Stephane Couturier<sup>2</sup>  
Michael Schmidt<sup>1</sup>  
Rene Colditz<sup>1</sup>  
José Luis Silván Cárdenas<sup>3</sup>  
Ricardo Llamas Barba<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad  
Av. Liga Periférico-Insurgentes Sur 4903, Parques del Pedregal, Tlalpan, México, Distrito Federal, CP. 14410  
{avazquez\*, mschmidt, rcolditz, rllamas}@conabio.gob.mx

<sup>2</sup> Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México  
Circuito exterior s/n, Ciudad Universitaria, Coyoacán, México, Distrito Federal, CP. 04510  
stephcamelo@lycos.com

<sup>3</sup> Centro de Investigación en Geografía y Geomática “Ing. Jorge L. Tamayo”, A.C.  
Contoy 137 Esq. Chemax, Lomas de Padierna, Tlalpan, México, Distrito Federal, CP. 14240  
jlsilvan@centrogeo.org.mx

**Abstract.** Vegetation biomass content is related to productivity and carbon fluxes between ecosystems and the atmosphere. In this sense mangroves are considered some of the most productive ecosystems even among tropical vegetation types. In this study we explore the estimation of aerial biomass and structural parameters of two mangrove areas in Mexico with contrasting physiognomy- the mangrove forest in Laguna Pom Atasta with maximum tree height above 15 m and mangroves in Laguna Agua Brava with tree height below 10 m,- using the radar backscatter signal of the ALOS PALSAR sensor. The imagery was acquired for year 2009 with HH and HV polarizations. We present some observations which hold for both study areas: the backscatter signal was highest in mangroves with low structural development and in degraded mangrove. Also, HH polarization imagery presented higher backscatter coefficient in mangroves than HV polarization imagery. The correlation between backscatter signal and ground estimated aerial biomass, tree height, and tree density was negative and significant for both polarizations. The highest  $r^2$  for both study areas were between the HH polarization and tree height, in mangroves of Laguna Pom Atasta with  $r^2= 0.71$  ( $\alpha=0.001$ ) and mangroves of Laguna Agua Brava  $r^2=0.53$  ( $\alpha=0.001$ ). This technique is thus recommended to explore empirical relationships between radar backscatter, structural parameters and aerial biomass for more mangrove types in Mexico. More ground-based data should be collected in order to validate a prediction model derived from the present preliminary work.

**Keywords:** Radar Backscatter Coefficient, Polarization, Structural parameters, Correlation

## 1. Introducción

A nivel mundial los manglares cubren 13,776,000 hectáreas y representan menos del 1% de los bosques tropicales (Giri et al. 2010); México cuenta con cerca de 770,057 ha de manglar (Conabio 2009), y es el cuarto país con mayor cobertura de este ecosistema (Giri. 2010). Actualmente existe la preocupación por el mantenimiento de las coberturas vegetales primarias, principalmente las tropicales, ya que su pérdida afecta la calidad de los servicios que proveen y favorece la emisión de gases de efecto invernadero (Parker et al. 2009). En este sentido la deforestación de los manglares provoca la emisión del carbono almacenado como biomasa y del metano almacenado en las turbas (Donato et al. 2011).

Las técnicas de percepción remota permiten identificar el contenido de carbono en la vegetación y sus cambios, ya que proveen observaciones sistemáticas de variables biofísicas de la vegetación, como la biomasa y la estructura vegetal (Rosenqvist et al. 2003). La biomasa es la cantidad de materia viva, inerte y orgánica muerta, por arriba o por debajo del suelo, expresada en toneladas de materia seca por unidad de área (Ravindranath y Ostwald, 2008). La biomasa aérea se ha estimado con productos derivados de sensores remotos ópticos y de radar, con la finalidad de identificar su relación con datos estimados en campo (Luckman et al. 1997, 2000; Mougin et al. 1999; Proysi et al. 2002; Simard et al. 2006; Simard et al. 2008).

Considerando la importancia de los manglares como cobertura vegetal primaria, en el estudio exploramos la estimación de la biomasa aérea y variables estructurales de dos áreas de manglar en México con diferentes características fisonómicas, empleando la señal de retrodispersión de imágenes de radar ALOS PALSAR en polarización HH y HV.

## 2. Metodología

Laguna Pom Atasta se ubica al suroeste del estado de Campeche. Las coordenadas extremas del área de estudio fueron: 92°24'29'' y 92°03'54'' longitud oeste y 18°42'33'' y 18°23'40'' latitud norte. Estos manglares son los más conservados de la región con los árboles más altos y vigorosos.

Laguna Agua Brava se localiza en el norte del estado de Nayarit. Las coordenadas extremas del área de estudio fueron: 105°39'48'' y 105°19'13'' longitud oeste y 22°17'26'' y 21°58'33'' latitud norte. La laguna forma parte del complejo Teacapán-Agua Brava-Marismas Nacionales, que tiene una extensión de 85,000 ha de manglar y representa el 11% del total de manglares a nivel nacional. Las áreas de estudio se muestran en la Figura 1.

La estructura de la comunidad de manglar y la biomasa aérea fue estimada con datos de campo. En Laguna Pom Atasta se realizaron ocho Unidades de Muestreo (UM) y en Laguna Agua Brava seis, cada una de 900 m<sup>2</sup> (30x30 m). En cada UM se registró la especie, la altura del árbol y su diámetro a la altura del pecho (DAP); sólo se registraron individuos con DAP $\geq$ 2.5cm. Para estimar la biomasa se utilizaron las formulas alométricas desarrolladas por Day et al. (1987).

Para cada área de estudio se utilizó una imagen de radar ALOS PALSAR en polarización HH (horizontal-horizontal) y HV (horizontal-vertical), del año 2009, con resolución de 12.5 m. Las imágenes fueron facilitadas en el marco del proyecto REDD+ y FCT. Las imágenes fueron extraídas y procesada en el programa ENVI 4.7. Inicialmente se extrajo la información del volumen y se aplicó un proceso de múltiples vistas para ajustar el tamaño de los píxeles a un tamaño real de terreno. Los productos resultantes fueron geocodificados a la proyección Universal Transversa de Mercator, Zona 15 y 13 Norte respectivamente para Laguna Pom Atasta y Laguna Agua Brava.

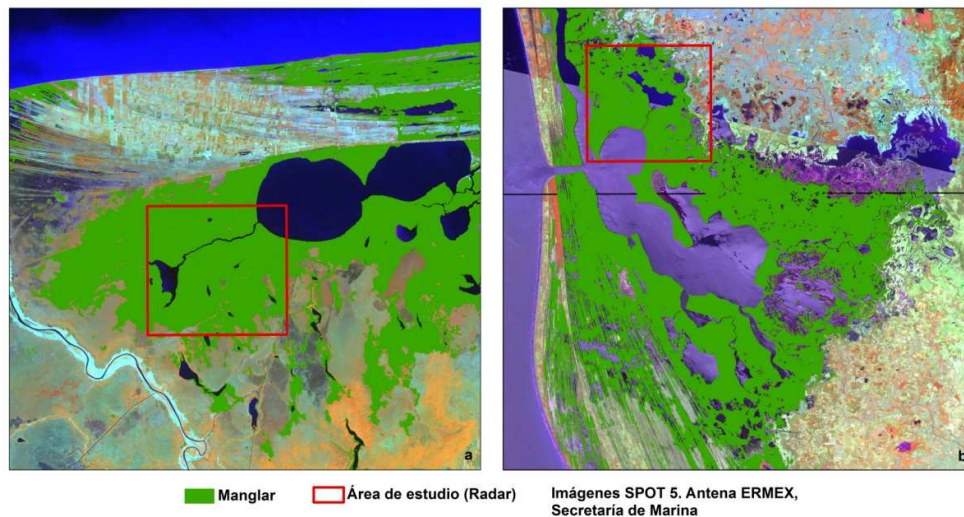


Figura 1. Áreas de estudio: a) Laguna Pom Atasta, Campeche y b) Laguna de Agua Brava, Nayarit.

A cada imagen se le aplicó el proceso de calibración y normalización radiométrica, con el que se obtuvo la señal de retrodispersión en decibeles (dB). A los productos resultantes se les aplicó un filtro de mediana (5x5) para minimizar las especulas. Posteriormente en el programa R 2.14.0 se aplicaron pruebas de correlación y determinación entre las variables estimadas con datos de campo y la señal de retrodispersión de cada imagen.

### 3. Resultados y Discusión

#### 3.1. Estructura de la comunidad de manglar y estimación de biomasa aérea con datos de campo

En el sitio de Laguna Pom Atasta las especies de manglar que se presentaron fueron *Laguncularia racemosa* y *Rhizophora mangle*, el resto de la comunidad se conformó de especies características de selva baja inundable. El sitio de Laguna Agua Brava Nayarit se caracterizó por la presencia de *L. racemosa*, *Avicennia germinans* y *R. mangle*. Estas especies no excedieron una altura mayor a 10 m.

El promedio de las variables estructurales estimadas por UM en ambas áreas de estudio se muestran en la Tabla 1.

La estructura de la comunidad de manglar fue diferente para ambos sitios. Los factores que influyen en la estructura de los manglares son la precipitación, temperatura, microtopografía, el hidroperíodo y la salinidad (Alongi 2009). Así, a pesar de que ambos sitios de manglar se ubican en regiones tropicales, éstos presentan condiciones ambientales y geomorfológicas diferentes.

En las dos áreas de estudio la biomasa aérea presentó valores superiores a los reportados para otros manglares de América Latina, por ejemplo para la Guyana Francesa, Fromard et al. (1998), obtuvo como valor promedio máximo 315 ton/ha de biomasa en bosques maduros de manglar; Golley et al. (1975) para bosques de manglar primarios en Panamá, reportaron cerca de 280 ton/ha de biomasa. Nuestros resultados sugieren una sobreestimación de biomasa aérea, ya que las formulas empleadas para la estimación fueron calibradas en rangos de DAP menores a los muestreados en este estudio (Day et al. 1987).

Tabla 1. Promedio de variables estructurales estimadas con datos de campo en ambas áreas de estudio

Área de estudio	Variable estimada (promedio)	UM 1	UM2	UM3	UM4	UM5	UM6	UM7	UM8
Laguna Pom Atasta	Altura (m)	7,68	9,62	9,16	6,03	6,86	7,06	7,52	6,55
	Densidad (árboles/ha)	900	1344	800	1127	1456	955	1577	1822
	Área basal (m <sup>2</sup> /ha)	37,98	29,84	32,92	19,4	27,69	21,52	31,26	21,35
	Biomasa aérea (ton/ha)	681,22	365,55	525,1	198,54	330,25	316,83	386,02	275,55
Laguna Agua Brava	Altura (m)	8,6	5,97	5,81	6,13	5,08	4,38	--	--
	Densidad (árboles/ha)	3489	3352	3900	9478	1611	2889	--	--
	Área basal (m <sup>2</sup> /ha)	18,94	15,22	15,54	34,7	10,28	28,06	--	--
	Biomasa aérea (ton/ha)	360,91	121,8	72,78	149,53	59,19	34,53	--	--

### 3.2. Estimación de biomasa aérea y variables estructurales con imágenes ALOS PALSAR

#### 3.2.1. Laguna Pom Atasta, Campeche

En la Figura 2 se presentan los histogramas y los rangos de valores de las imágenes en dB para las polarizaciones HH y HV. La imagen en polarización HH presentó una señal de retrodispersión más alta respecto a la imagen en polarización HV, posiblemente debido a que la polarización HH es más sensible a las condiciones de humedad e inundación de las superficies (Wang et al. 1995; Wang e Imhoff 1993), condiciones que son constantes en los manglares.

En las imágenes de ambas polarizaciones se observó que los manglares estructuralmente más desarrollados presentaron las señales de retrodispersión más bajas, mientras que los manglares con menor estructura presentaron las señales de retrodispersión más altas. Dicha respuesta está relacionada con factores de interacción superficie-vegetación y la constante dieléctrica de los materiales.

En lo que respecta a la interacción de la superficie-vegetación, se ha documentado que en áreas donde la vegetación presenta huecos en el dosel, un menor grado de desarrollo o está en regeneración, los efectos de doble o múltiple rebote en la señal de radar incrementan (Luckman et al. 1997; Imhoff 1995); mientras que aquellas áreas donde el manglar está más desarrollado estructuralmente, la señal de retrodispersión disminuye debido a su saturación por efectos del volumen del dosel (Proisy et al. 2000).

En la Tabla 2 se muestran los coeficientes de correlación y determinación con las variables estimadas en campo y las señales de retrodispersión. Las correlaciones más altas fueron negativas y se presentaron para la altura de los árboles con ambas polarizaciones, y con el área basal y biomasa en polarización HH.

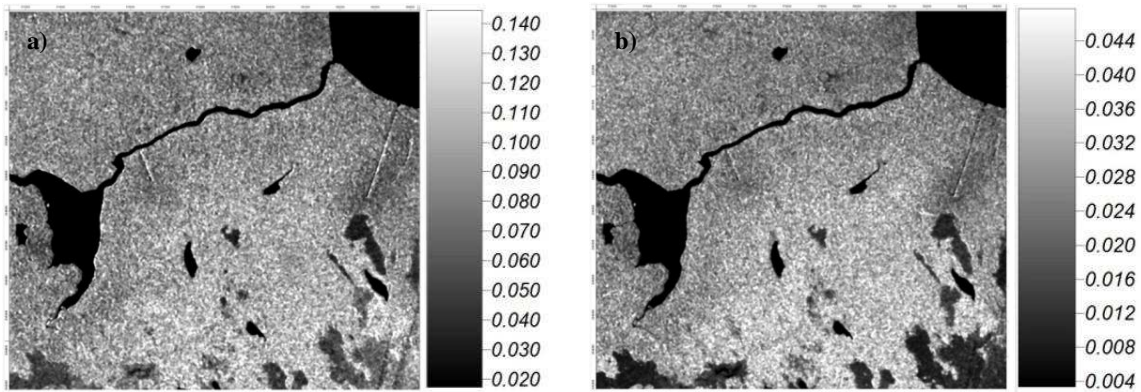


Figura 2. Imágenes e histogramas de retrodispersión. a) Polarización HH (a) y b) Polarización HV. Laguna Pom Atasta, Campeche.

Tabla 2. Correlaciones de la señal de retrodispersión en polarización HV y HH con la biomasa y variables estructurales estimadas en campo

Retrodispersión	Altura (m)		Área basal (m <sup>2</sup> /ha)		Densidad (árboles/ha)		Biomasa aérea (ton/ha)	
	r	r <sup>2</sup>	r	r <sup>2</sup>	r	r <sup>2</sup>	r	r <sup>2</sup>
Retrodispersión HH y UM	-0.84***	0.71***	-0.55***	0.29***	0.12	-0.01	-0.47***	0.20***
Retrodispersión HV y UM	-0.38**	0.13**	0.16	0	-0.19	0.02	0.23	0.03

r= Coeficiente de Pearson; r<sup>2</sup>= Coeficiente de determinación.

\*\*\* Significancia de 0.001; \*\* Significancia de 0.01; \*Significancia de 0.05.

La mayoría de los estudios que se han realizado en manglares hacen referencia a una mayor sensibilidad de la polarización HV para la estimación de variables estructurales y biomasa (Mouguin et al. 1999; Proisy et al. 2000; Lucas et al. 2007). Sin embargo en este estudio la polarización HH fue la que presentó una mayor sensibilidad, posiblemente debido a que dicha polarización además de responder a la altura de la vegetación, también está presentando una fuerte interacción con la superficie del manglar, tal como ya se ha mencionado anteriormente (Hess et al. 1990; Wang et al. 1995).

En estudios realizados en ecosistemas de manglar con las bandas L y P en polarizaciones HH, VV y HV, se han encontrado correlaciones negativas entre las variables de altura, volumen de crecimiento y biomasa con la señal de retrodispersión (Mouguin et al. 1999; Proisy et al. 2000; Lucas et al. 2007).

Proisy et al. (2000), reportan que para manglares con cantidades de biomasa menores a 50 ton/ha el efecto de retrodispersión en la polarización HV de las bandas L y P está principalmente dominado por la superficie. Para cantidades menores a 150 ton/ha es un efecto de interacción entre la superficie-troncos-ramas-dosel de los árboles, provocando un efecto de doble o múltiple rebote. Mientras que para cantidades de biomasa superiores a 300 ton/ha el efecto del volumen del dosel provoca la saturación de las señales.

### 3.2.2. Laguna Agua Brava, Nayarit

En la Figura 2 se muestra que para Laguna Agua Brava la imagen en polarización HH también presentó una mayor señal de retrodispersión que la imagen en polarización HV.

También en esta área se presentó el mismo patrón de respuesta que en Laguna Pom Atasta. Las áreas con la señal de retrodispersión más alta corresponden a los manglares con un menor desarrollo estructural, mientras que las áreas con la menor señal de retrodispersión presenten un mayor desarrollo estructural.

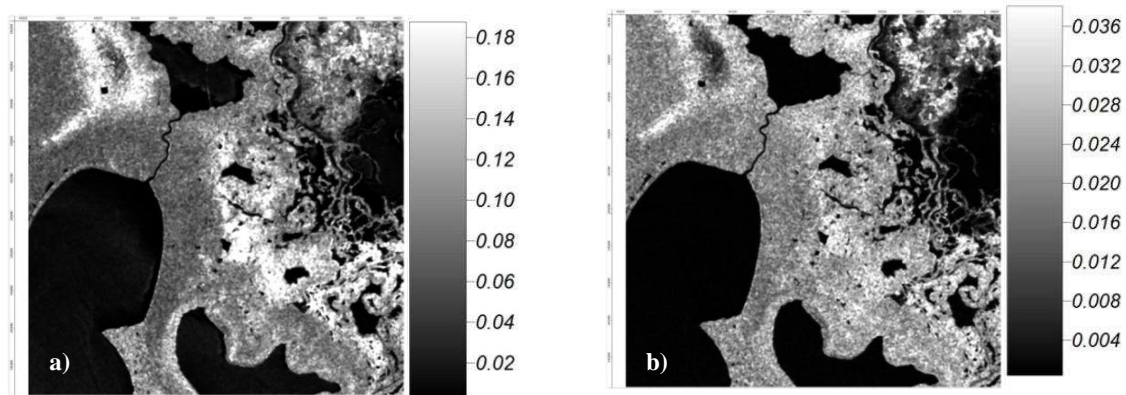


Figura 3. Imágenes e histogramas de retrodispersión. a) Polarización HH (a) y b) Polarización HV. Laguna Agua Brava, Nayarit.

En la Tabla 3 se muestra la correlación de las imágenes de radar con los datos de biomasa y estructura, las correlaciones más altas también fueron negativas y se obtuvieron para la altura y biomasa en ambas polarizaciones, y para el área basal y la densidad en polarización HV.

Tabla 3. Correlaciones de la señal de retrodispersión en polarización HV y HH con la biomasa y variables estructurales estimadas en campo

Retrodispersión	Altura (m)		Área basal (m <sup>2</sup> /ha)		Densidad (árboles/ha)		Biomasa aérea (ton/ha)		Altura (m)	
	r	r <sup>2</sup>	r	r <sup>2</sup>	r	r <sup>2</sup>	r	r <sup>2</sup>	r	r <sup>2</sup>
Retrodispersión HH y UM	-0.74***	0.53***	0.18	0.0	-0.08	-0.20	-0.17	0.0	-0.64***	0.41***
Retrodispersión HV y UM	-0.71***	0.49***	-0.56***	0.29***	-0.64***	0.40***	0.29	0.05	-0.72***	0.50***

r= Coeficiente de Pearson; r<sup>2</sup>= Coeficiente de determinación.

\*\*\* Significancia de 0.001; \*\* Significancia de 0.01; \*Significancia de 0.05.

A pesar de que los manglares en las dos áreas de estudio presentan condiciones estructurales diferentes, en general la correlación de las variables con la señal de retrodispersión fue negativa, posiblemente debido a efectos de doble o múltiple rebote.

Es necesario utilizar otros productos derivados de radar, como la fase, para obtener correlaciones más altas con datos de estructura y biomasa en campo. En lo que respecta al uso de la fase para estimaciones/correlaciones de biomasa, ésta se ha utilizado para la detección de cambios a través del tiempo, y para la estimación de la altura de los árboles con técnicas de interferometría (Luckman et al. 1997; Wagner et al. 2003; Santoro et al. 2007). También es necesario explorar la respuesta de otras longitudes de onda y polarizaciones.

#### 4. Conclusiones

En México no hay suficientes trabajos respecto a la generación de fórmulas alométricas para especies de manglar (especie-específico), motivo por el cual posiblemente en ambas áreas de estudio los valores de biomasa estén sobrestimados, ya que no se ha documentado para áreas de manglar de América Latina y el Caribe valores de biomasa como los que se reportan en este estudio.

Es necesario explorar la respuesta de otras longitudes de onda y polarizaciones, con la finalidad de identificar su nivel de respuesta y correlación con los datos de campo; también es importante considerar el incremento de las unidades de muestro en las áreas de estudio, para contar con información disponible para la calibración de los modelos y su validación. Se requiere la exploración de otras técnicas de radar (como manejo de fase para la obtención de coherencia y técnicas de interferometría radar), con la finalidad de mejorar los resultados, ya que varios autores con dichas técnicas sugieren una menor saturación de la respuesta de las señales a altas cantidades de biomasa (Luckman et al. 1997; Wagner et al. 2003; Santoro et al. 2007; Simard et al. 2006; Simard et al. 2008).

#### Agradecimientos

El estudio se realizó en el marco del proyecto “Los manglares de México: estado actual y establecimiento de un programa de monitoreo a largo plazo” de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. El estudio forma parte de la defensa de maestría de la primera autora como parte del programa de Posgrado en Geomática en el Centro de Investigación en Geografía y Geomática “Ing. Jorge L. Tamayo”, A.C.

#### Referencias

- Alongi, D. M. **The energetics of mangrove forest**. Netherlands: Springer, 2009. 216 p.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). **Manglares de México: Extensión y distribución**. Distrito Federal: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, 2009.
- Day, J. W. Jr.; Conner, W. H.; Ley-Lou, F.; Day, R. H.; Machado N. M. The productivity and composition of mangrove forests, Laguna de Términos, México. **Aquatic Botany**, n. 27, p. 267-284, 1987.
- Donato, D. C.; Kauffman, J. B.; Murdiyarto, D.; Kurnianto, S.; Stidham, M.; Kanninen, M. Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. **Nature Geoscience**, 3 abril de 2011, p. 1-5, 2011.
- Fromard, F.; Puig, H.; Mougin, E.; Marty, G.; Betoulle, J. L.; Cadamuro, L. Structure, above-ground biomass and dynamics of mangrove ecosystems: new data from French Guiana. **Oecologia**, n. 115, p. 39-53, 1998.
- Giri, C.; Ochieng, E.; Tieszen, L. L.; Zhu, Z.; Singh, A.; Loveland, T.; Masek, J.; Duke, N. Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data. **Global Ecology and Biogeography**, consultado en: [www.blackwellpublishing.com/geb](http://www.blackwellpublishing.com/geb), p. 1-6, 2010
- Golley, F.; Odum, H. T.; Wilson, R. F. The Structure and Metabolism of a Puerto Rican Red Mangrove Forest in May. **Ecology**, v. 43, n. 1, p. 9-19, 1962.
- Hess, L. L.; Melack, J. M.; Simonett, D. S. Radar detection of flooding beneath the forest canopy: a review. **International Journal of Remote Sensing**, v. 11, n. 7, p. 1313-1325, 1990.



- Imhoff, M. Radar Backscatter and Biomass Saturation: Ramifications for Global Biomass Inventory. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 33, n. 2, p. 511-518, 1995.
- Luckman, A.; Baker, J.; Wegmüller, U. Repeat-Pass interferometric coherence measurements of disturbed tropical forest from JERS and ERS satellites. **Remote Sensing of Environment**, v. 3, n. 73, p. 350-360, 2000.
- Luckman, A.; Baker, J.; Kuplich, T. M.; Yanasse, C. C. F.; Frery, A. C. A Study of the Backscatter and Biomass for Relationship Regenerating Spaceborne SAR between Radar Tropical Forest Instruments. **Remote Sensing Environment**, n. 60, p. 1-13, 1997.
- Lucas, R.; Mitchell, A. L.; Rosenqvist, A.; Proisy, C.; Melius, A.; Ticehurst, C. The potential of L-band SAR for quantifying mangrove characteristics and change: case studies from the tropics. **Aquatic Conservation Marine and Freshwater Ecosystems**, n. 17, p. 245-264, 2007.
- Mougin, E.; Proisy, C.; Marty, G.; Fromard, F.; Puig, H.; Betoulle, J. L.; Rudant, J. P. Multifrequency and multipolarization radar backscattering from mangrove forests. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 1, n. 37, p. 94-102, 1999.
- Parker, C.; Mitchell, A.; Trivedi, M.; Mardas, N. **The Little REDD+ Book. An updated guide to governmental a non-governmental proposals for reducing emissions from deforestation and degradation.** Oxford, Inglaterra: Global Canpy Foundation, 2009, 132 p.
- Proisy, C.; Mougin, E.; Fromard, F.; Karam, M. A. Interpretation of polarimetric radar signatures of mangrove forests. **Remote Sensing of Environment**, n. 71, p. 56-66, 2000.
- Proisy, C.; Mougin, E.; Fromard, F.; Trichon, V.; Karam, M. A. On the influence of canopy structure on the radar backscattering of mangrove forests. **Int. J. Remote Sensing**, v. 23, n. 20, p. 4197-4210, 2002.
- Ravindranath, N. H. y Ostwald, M. **Carbon Inventory Methods. Handbook for Greenhouse Gas Inventory, Carbon Mitigation and Roundwood Production Projects.** Netherlands: Springer, 2008, 308 p..
- Rosenqvist, A.; Milne, A.; Lucas, R.; Imhoff, M.; Dobson, C. A review of remote sensing technology in support of the Kyoto Protocol. **Environmental Science & Policy**, n. 6, p. 441-455, 2003.
- Simard, M.; Rivera-Monroy, V. H.; Mancera-Pineda, J. E.; Castañeda-Moya, E.; Twilley, R. R. A systematic method for 3D mapping of mangrove forests based on Shuttle Radar Topography Mission elevation data, ICESat/GLAS waveforms and field data: Application to Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia. **Remote Sensing of Environment**, n. 112, p. 2131-2144, 2008.
- Simard, M.; Zhang, K.; Rivera-Monroy, V. H.; Ross, M. S.; Ruiz, P. L.; Castañeda-Moya, E.; Twilley, R. R.; Rodriguez, E. Mapping height and biomass of mangrove forests in everglades national park with SRTM elevation data. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 72, n. 3, p. 299-311, 2006.
- Wang, Y.; Imhoff, M. L. Simulated and observed L-HH radar backscatter from tropical mangrove forests. **International Journal of Remote Sensing**, n. 14, p. 2819-2828, 1993.
- Wang, Y.; Hess, L. L.; Filoso, S.; Melack, M. M., Understanding the Radar Backscattering from Flooded and Nonflooded Amazonian Forests: Results from Canopy Backscatter Modeling. **Remote Sensing Environment**, n. 54, p. 324-332, 1995.
- Wagner, W.; Luckman, A.; Vietmeier, J.; Tansey, K.; Balzter, H.; Schmullius, C.; Davidson, M.; Gaveau, D.; Gluck, M.; Le Toan, T.; Quegan, S.; Shvidenko, A.; Wiesmann, A.; Yu, J. J. Large-scale mapping of boreal forest in SIBERIA using ERS tandem coherence and JERS backscatter data. **Remote Sensing of Environment**, v. 2, n. 85, p. 125-144, 2003.
- Santoro, M.; Shvidenko, A.; McCallum, I.; Askne, J.; Schmullius, C. Properties of ERS-1/2 coherence in the Siberian boreal forest and implications for stem volume retrieval. **Remote Sensing of Environment**, n. 106, p. 151-172, 2007.