

# **ABORDAJE REGIONAL MEDIANTE IMÁGENES DE RADAR PARA EL SEGUIMIENTO DE LA BIOMASA FORESTAL DE LA AMAZONÍA**

L.S. ARAUJO; J.R. SANTOS; M.S.PARDI LACRUZ

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE  
Av. dos Astronautas, 1758 São José dos Campos, SP - Brasil  
Fax: +55 12 3456449 lucian@ltid.inpe.br

Resumen: El monitoreo del proceso de antropización de la Amazonía brasileña ha sido realizado tradicionalmente con datos ópticos del sensor TM/Landsat. Sin embargo, la cobertura constante de nubes en algunas partes de la Amazonía, sistemáticamente ha afectado el seguimiento, necesitando modelos de estimación estadística para inferir las informaciones cubiertas por las nubes. Como una forma de solucionar tal problema, las imágenes de radar están siendo utilizadas para, asociadas con datos ópticos, estudiar la evolución de los diversos procesos de uso de la tierra en esta región tropical. Dentro de este contexto, este estudio presenta el estado actual del uso de imágenes de radar (JERS-1) como herramienta de estratificación de la biomasa vegetal. Para asegurar la representatividad de los diferentes paisajes que se encuentran en la región Amazónica, fueron seleccionadas cinco áreas piloto localizadas en los estados Acre, Amazonas, Mato Grosso, Pará y Roraima, con presencia de bosque tropical húmedo y de zonas de transición bosque-sabanas. Un modelo de regresión estadística fue utilizado para establecer la relación entre la biomasa y los datos de retrodispersión obtenidos de las imágenes-radar. Basado en la ecuación de regresión que mejor se ajustó a los datos, fueron definidos los intervalos de clase y la cartografía de la biomasa para todas las áreas de estudio. El objetivo principal es contribuir con el proceso de monitoreo regional del paisaje, debido a las acciones antrópicas que ocurren en la Amazonía. Este estudio podrá servir también como soporte de informaciones de los modelos relacionados a los estudios de cambios globales.

P.C.: biomasa, bosque tropical, sabana, radar, Amazonía, monitoreo, inventario forestal.

Summary: To monitor of the deforestation process in Brazilian Amazonia has been carried out traditionally with optical data of the TM/Landsat images. However, the constant covering of clouds in some parts of the Amazonia, systematically it has affected this monitor approach, needing of the statistical models to infer the covered informations over the clouds. As a form of solving such a problem, the radar images are being used for monitoring, associated with optical data, the diverse processes of land use in this tropical region. In this frame, the study presents the current state of the use of radar images (JERS-1) as tool of stratification of the forest biomass. To assure the representativeness of the different landscapes that occurs in Amazon region five pilot-areas (Acre, Amazonas, Mato Grosso, Pará and Roraima) were selected, where it occurs of the humid tropical forest and of areas of transition zone (contact areas of forest and savanna formations). A statistical regression model was used to establish the relationship between biomass and backscatter values derived from radar images. Based on the best regression adjusted equation it was defined the class intervals and to map of the biomass for all the study areas. The main idea of this research is to improve the approach in the regional monitoring of the landscapes changes, due to the human action in the Amazonia. This study will be able to also generate substantial support to the development of models related to the studies of global changes.

K.W.: biomass, tropical rain forest, savanna, radar, Amazonia, monitoring, forest inventory.

## **INTRODUCCIÓN**

Los bosques tropicales de la Amazonía brasileña, constituyen una gran reserva de carbono, objeto de discusiones científicas en el ámbito mundial, impulsadas por las especulaciones sobre la reducción de su extensión y sus implicaciones en el clima. A principio, la tala de los bosques y la conversión en áreas destinadas a la agricultura y pastaje, resulta en un flujo continuo de carbono para la atmósfera, contribuyendo a la producción del llamado ‘efecto invernadero’. Diversos estudios sobre los cambios globales han sido conducidos por la comunidad científica, sin embargo, para modelar sus

efectos es necesario contar con informaciones básicas sobre la extensión, tipología vegetal y biomasa afectada por la tala y quema, además del conocimiento acerca del porcentaje de aquellas áreas donde está naturalmente, ocurriendo la recomposición forestal.

Considerando la extensa área de 5 millones de km<sup>2</sup>, la diversidad de regiones fitoecológicas y los relativamente pocos levantamientos realizados hasta el momento, la base de datos sobre la Amazonía cuenta con poca información. Diversas propuestas para la optimización del proceso de inventario y monitoreo forestal han sido implementadas empleando técnicas de percepción remota, a través de imágenes de sensores ópticos (TM/Landsat) complementadas con imágenes de radar, con menor interferencia de nubes. Esos sistemas sensores en la región de microondas suministran informaciones sobre las propiedades estructurales de los albos, permitiendo una mejor relación con las medidas de parámetros forestales, como biomasa y altura. Dentro de este contexto, el presente trabajo aborda el procedimiento metodológico y los resultados alcanzados con el uso de imágenes del sensor JERS-1 para el delineamiento de la biomasa, en diferentes formaciones forestales de la Amazonía brasileña.

## MATERIALES Y MÉTODO

La selva amazónica es conceptualmente definida como bosque tropical húmedo, sin embargo en su extensión ocurre una diversidad de tipos fisonómico-estructurales, incluyendo zonas de transición entre bosques y sabanas. Para tener una representatividad de esa diversidad de paisajes, fueron seleccionadas 5 áreas piloto, localizadas en los estados Acre (próximo a Rio Branco – *Proyecto de Asentamiento Dirigido Humaitá*), Amazonas (próximo a Manaus), Mato Grosso (región de Comodoro, próximo del límite con Rondônia), Pará (próximo a la *Floresta Nacional de Tapajós*) y Roraima (región de Alto Alegre-Mucajaí). En dichas áreas se encuentran también patrones típicos de uso de la tierra, desde la ocupación para agricultura de subsistencia y explotación maderera, hasta grandes haciendas agropecuarias. En la última década los productos de radares orbitales se tornaron disponibles a los usuarios y con diferentes polarizaciones y frecuencias, se buscó utilizar aquellos que, de manera operacional, atendiesen al objetivo propuesto de cartografía de la biomasa. Así, fueron seleccionadas imágenes del satélite JERS-1 (*Japanese Earth Satellite-1*), banda L (23 cm), polarización horizontal (HH) y con resolución del *pixel* de 12,5 metros, con el objetivo de evaluar la capacidad de esas imágenes para la cartografía del uso y cobertura del suelo y su biomasa, de manera de atender los intereses de *Global Rain Forest Monitoring Project (GRFM/NASDA)*, de probar mecanismos de inventario y monitoreo forestal a partir de datos de radar.

Las imágenes digitales del JERS-1, en modo amplitud, fueron debidamente georreferenciadas con cartas topográficas y posteriormente convertidas para el modo intensidad, para extraer los valores de retrodispersión de las áreas representativas de cada clase temática identificada. También fueron utilizadas imágenes TM/Landsat como información complementaria para contribuir a la identificación del paisaje y selección de las muestras en las imágenes de radar. La representatividad de las muestras seleccionadas fue verificada en trabajo de campo y sobre ellas se realizó inclusive, el inventario forestal. Los datos recogidos en campo, debidamente georreferenciados, fueron localizados en las imágenes de radar y posteriormente se extrajeron los valores digitales medios de cada una de las muestras y se convirtieron en valores de retrodispersión (dB), a través de la fórmula:

$$\sigma^{\circ} = 10 \log_{10} \frac{\sum_{i=1}^n DN^2}{n} + CF$$

DN = Número digital del *pixel* de la imagen (16 bits);

n = número de *pixels* de la muestra;

CF = factor de calibración (-68,5 dB).

Como fue mencionado anteriormente, se realizó un trabajo de campo de manera de calibrar las informaciones de las imágenes y obtener los datos de biomasa de las diversas formaciones vegetales estudiadas. En el caso de las áreas de bosque primario y secundario fueron utilizadas parcelas de 2500 y 1000 m<sup>2</sup> respectivamente y se obtuvieron los parámetros dendrométricos (diámetro y altura) de todos los árboles con DAP > 10 en áreas de bosque primario y DAP > 5 cm en bosques secundarios.

También se obtuvo la posición de cada individuo dentro de la parcela así como la identificación botánica de los mismos. A partir de los valores de diámetro y altura se calculó la biomasa (peso seco) utilizando ecuaciones alométricas específicas para bosque primario y secundario, propuestas por Brown et al. (1989) y Uhl et al. (1988) respectivamente:

$$\text{Biomasa} = 0,44 * (\text{DAP}^2 * \text{altura})^{0,9719}$$

$$\ln \text{Biomasa} = - 2,17 + 1,02 \ln (\text{DAP})^2 + 0,39 \ln \text{altura}$$

El cálculo de la biomasa de los diversos tipos de sabana fue realizado a través del método directo, o sea, corte al ras y pesado del material arbustivo/arbóreo en parcelas de 500 m<sup>2</sup>. En cada parcela, se colectó el material herbáceo (generalmente graminóide) de 5 sub-parcelas de 1m<sup>2</sup>. Este material fue pesado en campo (peso fresco) y posteriormente secado en estufa y determinado el peso seco para consecuente realizar el cálculo de la biomasa.

Los valores de biomasa, en conjunto con los valores obtenidos de las imágenes JERS-1(dB) para cada muestra, totalizando 175, fueron integrados y analizados a través de modelos de regresión. Es importante mencionar que de ese total, 14 muestras fueron referenciadas del trabajo de Luckman et al. (1995), por ser un material disponible y representativo de bosques tropicales húmedos en la región próxima a la ciudad de Manaus.

Luego del análisis de diferentes modelos fue seleccionado el modelo que más se ajustó a los datos y se aplicó sobre las imágenes JERS-1 (procesadas utilizando un filtro Gamma 5x5 para reducir el ruido *speckle*) a través de la estratificación de la imagen en niveles de dB correspondientes a los intervalos de clase de biomasa pre-establecidos, de forma de obtenerse la distribución espacial de esa biomasa.

## RESULTADOS

Las cinco áreas de estudio en la Amazonía son representativas de los siguientes tipos fisonómicos: bosque tropical húmedo abierto o denso, bosque tropical abierto con bambú, bosque de transición, sucesión secundaria, sabana boscosa, sabana abierta y sabana pastizal (Figura 1).

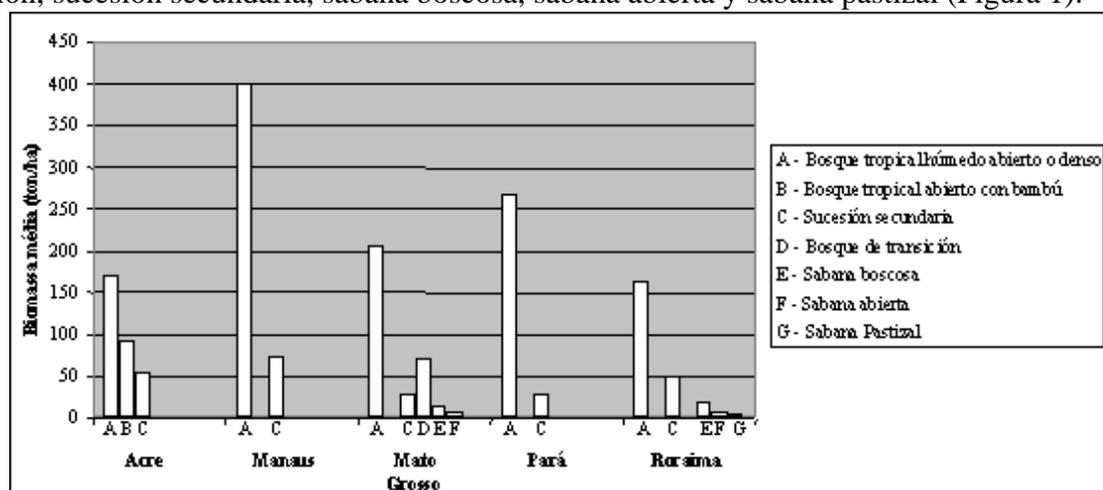


Fig. 1. Valores medios de biomasa de los diferentes tipos fisonómicos de bosques y sabanas en las áreas de estudio.

Analizando las características fisonómico-estructurales de las áreas en estudio y su correspondiente aspecto en las imágenes del JERS-1, las regiones de bosque tropical de gran diversidad florística presentaron la ocurrencia predominante de las familias Burceraceae, Myrtaceae, Lauraceae, Sapotaceae y Violaceae. Las parcelas inventariadas presentaron en media 450 árboles/ha, con altura media de 15 m, DAP de 22 cm y una biomasa estimada de 215,33 ton/ha. En el caso específico del bosque abierto con bambú con amplia distribución en el sudoeste de la Amazonía, fue observado un acentuado decrecimiento de la biomasa, (media de 93,61 ton/ha), razón de la predominancia de individuos de la especie *Guadua weberbaueri* Pilger (presentando aspectos de

senescentes en la época investigada) en comparación a los típicos árboles leñosos. Fueron encontrados cerca de 280 árboles/ha (DAP > 10 cm), con altura media de 14 m y DAP medio de 18 cm. La presencia marcante de 2540 individuos/ha de *Guadua*, con las copas midiendo entre 3,5 y 5,0 cm, según la edad de la población, ofrece un paisaje bien contrastante en el sudoeste de la Amazonía. A pesar de la diferencia de los valores medios de biomasa y de la composición florística y estructural, las áreas de bosque, con o sin bambú, no son bien discriminadas a través de los valores de dB, con media de -7,36 y -7,47 en las imágenes JERS-1, respectivamente.

Las áreas de sucesión secundaria presentaron biomasa variando de 17,74 a 77,24 ton/ha, en función de los diferentes estadios sucesionales y por la intensidad de uso de la tierra anterior a ésta fase de regeneración natural. En estas áreas fueron encontrados en media, 1500 árboles/ha. En las áreas de sucesión forestal más jóvenes, el DAP medio es del orden de 7,0 cm y la altura media de 5,5 m; en las sucesiones de edades más avanzadas, el DAP medio fue del orden de 17 cm y la altura de 12 m. Esa heterogeneidad fisonómico-estructural causa variaciones en los valores de retrodispersión de -6,24 a -10,4 dB.

En las áreas de sabanas, que ocurren en los locales estudiados de los estados Roraima (región norte de la Amazonía) y Mato Grosso (región central de la Amazonía), es evidente el contacto con las áreas de bosque: en el primer caso, el contacto es más abrupto mientras que en el segundo existe una zona de transición con una mezcla de especies típicas de las dos fisionomías. Estas áreas de transición presentan la estructura típica de bosques claros (*cerradão*), con una biomasa media de 80,19 ton/ha y valores de retrodispersión alrededor de -7,0 dB. En las tres fisionomías de sabanas, hay dominio de cobertura herbácea, principalmente de gramíneas. La biomasa aérea varía de 5 a 15 ton/ha (peso seco), cuyos mayores valores están asociados a aquellas áreas de sabanas con presencia de especies leñosas, caso típico de la sabana boscosa. Este tipo de sabana presentó una significativa distinción en la imagen JERS en valores de retrodispersión, comparada a las otras clases de sabana, con valores medios de -9,3, -11,8 y -13,5, respectivamente para las sabanas boscosa, abierta y pastizal.

Entre los varios modelos examinados para analizar la relación entre valores de dB *versus* biomasa, la función logarítmica dada por la ecuación  $[y = 1,4335 \ln(x) - 14,31]$ , fue la que expresó mejor el comportamiento de los datos (Figura 2), demostrando para la relación existente entre esas variables, un coeficiente de determinación ( $r^2$ ) de 0,6794.

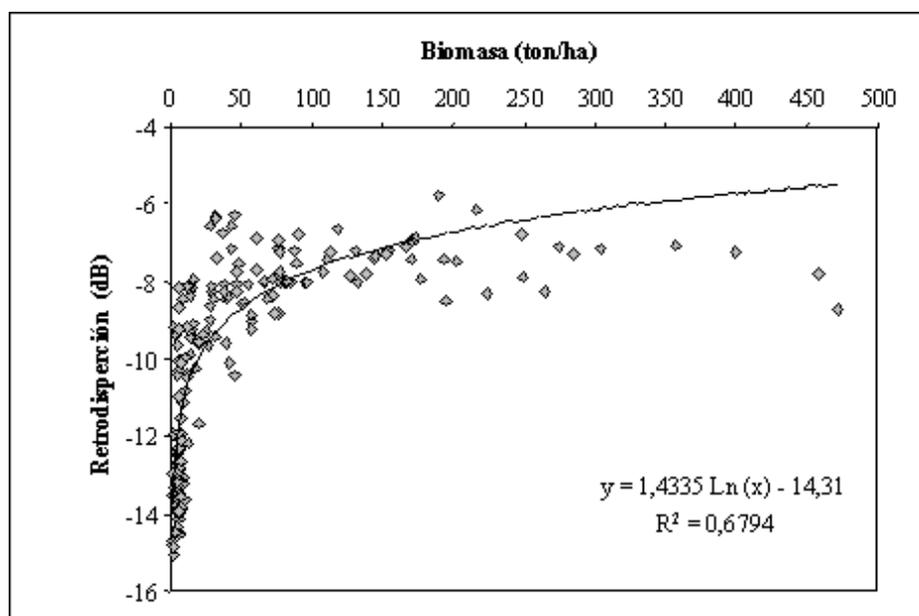


Fig. 2. Relación entre las variables biomasa y retrodispersión derivado de imágenes JERS.  
Fuente: Santos et al. (2000).

Basado en esa ecuación de regresión, se realizó la estratificación de la imagen en rangos de valores de retrodispersión, generando un mapa de biomasa por intervalos de clases (Figura 3).

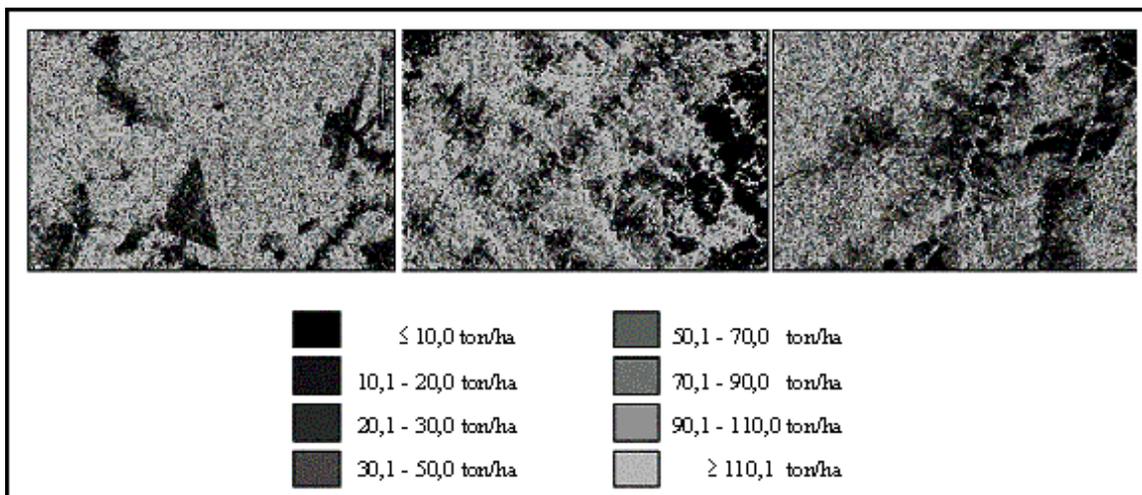


Figura 3. Ejemplos de mapas de biomasa en áreas de formación forestal y de sabanas, generados a partir de las imágenes de radar.

Una de las limitaciones de los datos de radar en banda L es la saturación de la señal para valores de biomasa superiores a 60 ton/ha. Este estudio demuestra, en forma práctica, que los datos de retrodispersión mayores a este valor no responden a las diferenciaciones de la biomasa, comprobando las citaciones de Luckman et al. (1995) y Araujo et al., 1999.

### CONCLUSIONES

El procedimiento metodológico basado en la utilización de los datos del JERS-1 se mostró, en general, adecuado para indicar las variaciones de biomasa de la cobertura vegetal estudiada. El análisis de los valores de retrodispersión permite caracterizar con precisión y mapear los límites entre las tipologías de bosques y sabana. El hecho de la saturación de la señal en las imágenes de radar en banda L para valores de biomasa superiores a 60 ton/ha, limita la utilización de ese tipo de producto para caracterizar variaciones intra-clases en los bosques tropicales primarios. Sin embargo, este procedimiento es adecuado para analizar la dinámica de la biomasa en formaciones de sabanas, bosques claros y áreas en sucesión secundaria, que poseen normalmente, valores menores de biomasa que los bosques tropicales densos y abiertos. Actualmente están siendo conducidos experimentos en la Amazonía con imágenes de radar en banda P, de mayor capacidad de penetración en el dosel forestal y punto de saturación de las señales de retrodispersión para valores próximos a 300 ton/ha.

### AGRADECIMIENTOS

Este proyecto fue llevado a cabo gracias al soporte financiero del INPE/MCT y FAPESP (proceso 1997/0943-8). Los autores agradecen a: CNPq (proceso 300677/91, 381246/97-3, 380597/99-3) e INCRA/Rondônia, UFAC/Acre, CPAF-Roraima/EMBRAPA, SUDAM/Belém e IBAMA/Santarém.

### BIBLIOGRAFÍA

- Araujo, L.S.; Santos, J.R.; Freitas, C.C.; Xaud, H.A.M. 1999. *The use of microwave and optical data for estimating aerial biomass of the savanna and forest formations at Roraima State, Brazil*. In: IGARSS'99 – International Geoscience and Remote Sensing Symposium. June 28th–July 2th, 1999. Hamburg, Germany. [CD-ROM].
- Brown, S., Gillespie, A. J. R., and Lugo, A. E. 1989. *Biomass estimation methods for tropical forest with applications to forest inventory data*. *Forest Science*, **35**, 881-902.
- Luckman, A.J., Baker, J., Lucas, R., Kuplich, T.M. 1995. *Retrieval of the biomass of regenerating tropical forest in Amazonia using spaceborne SAR data*. In: International Symposium on Retrieval of Bio- and Geophysical Parametres from SAR Data for Land Applications, Toulouse, France,

October 1995. ESA, Noordwijk, The Netherlands, ESA SP-441, pp.107-118.

Uhl, C., Buschbacher, R., and Serrão, E. A. S. 1988. *Abandoned pastures in eastern Amazonia, I: patterns of plant succession. Journal of Ecology*, **76**, 663-681.