

INCERTIDUMBRES ASOCIADAS AL TAMAÑO DE PARCELAS UTILIZADAS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA BIOMASA AÉREA EN BOSQUES DE TIERRA FIRME DEL PNN AMACAYACU

Yepes Adriana¹; Duque Alvaro²; Cárdenas Dairon³ & Sua Sonia⁴

Cerro Gallineta

RESUMEN

La biomasa de los bosques amazónicos constituye un importante reservorio de carbono en el ciclo global de este elemento. No obstante, la biomasa aérea de estos bosques continúa siendo tema de estudio de muchas investigaciones, dado que aún existen incertidumbres asociadas con su estimación. En general, un inventario de biomasa es una actividad que conlleva un costo significativo, por lo que es importante analizar cómo se puede mejorar la ejecución del mismo para que éste sea más eficiente en términos de cumplir con la precisión deseada a un costo mínimo. Es por esta razón que el presente estudio propone una metodología para determinar el tamaño y número de parcelas óptimo para estimar la biomasa aérea y los contenidos de carbono almacenados en bosques naturales a escala local. El estudio se llevó a cabo empleando la base de datos de la parcela de Amacayacu, localizada en la Amazonia colombiana (Leticia, Colombia) y correspondiente a un bosque húmedo tropical. Se realizaron análisis estadísticos de *bootstrap* y de correlación espacial para determinar el efecto del tamaño y número de

muestras sobre la estimación de la biomasa aérea y los contenidos de carbono asociados. Al final de los análisis se identificó el tamaño y número de parcelas más apropiado para realizar en el futuro los muestreos de campo y análisis posteriores, que permitan obtener estimados de biomasa aérea y carbono con bajos niveles de incertidumbre, muy importantes actualmente para la comprensión del papel de los bosques tropicales en el contexto del cambio climático global.

Palabras clave:

Amacayacu, Amazonia colombiana, biomasa aérea, contenidos de carbono, tamaño de parcela.

ABSTRACT

Changes in the biomass of Amazon region forest represent an important component of the global carbon cycle but the aboveground biomass of these forests remains poorly quantified. Minimizing the error in the forest aboveground biomass estimates is necessary in order to reduce the uncertainty in future Amazon

¹ Ingeniera Forestal, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Calle 59A No 63-20, Bloque 20. apyepes@gmail.com

² Ingeniero Forestal PhD Profesor Asociado Departamento de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Calle 59A No 63-20, Bloque 20. ajduque@unal.edu.co

³ Biólogo, Coordinador Programa de Ecosistemas y Recursos Naturales, Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas SINCHI. Calle 20 No. 5 -44. Bogotá. dcardenas@sinchi.org.co

⁴ Ingeniera Catastral y Geodesta, Investigadora Programa de Ecosistemas y Recursos Naturales, Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas SINCHI. Calle 20 No. 5 -44. Bogotá. ssua@sinchi.org.co

carbon budgets. An inventory of biomass is an activity that involves significant cost, so it is important to analyze how to make it more efficient in terms of accuracy and minimal cost. This study was designed to explicitly formulate the effect of plot size and number of plots on the variability of aboveground biomass (AGB) and stocks carbon estimation in local scale. A unique dataset plot was used (10-ha). It was the Amacayacu plot located in the Colombian Amazon (Leticia, Colombia). We used a bootstrapping method to assess the effect of sample area on the aboveground biomass estimate and simulate results one would obtain from sampling small plots. This study provides an easy method to assess dataset limitations in efforts to estimate forests aboveground biomass (AGB) of primary importance in the scope of global climate change.

Keyword

Aboveground biomass, Amacayacu, Size plots, Colombian Amazon, Carbon stocks.

INTRODUCCIÓN

El inventario de biomasa es un requisito básico para desarrollar proyectos forestales que tengan como objetivo la obtención de incentivos económicos por las actividades desarrolladas (Emmer, 2007). En este se



Marcando arboles en la parcela

cuantifica el almacenamiento de carbono en diferentes reservorios (*e.g.* biomasa aérea, biomasa subterránea, necromasa y suelo) y coberturas de la tierra (*e.g.* bosques naturales, bosques plantados, pastizales, etc.), permitiendo, también, medir el impacto de un determinado proyecto en la reducción de emisiones de dióxido de carbono (CO₂), conservación y manejo sostenible de los bosques y/o captura del CO₂ por medio del crecimiento de la vegetación secundaria existente (Gibbs *et al.*, 2007, GOF-C-GOLD, 2008, Rüginitz *et al.*, 2009).

No obstante, un inventario de biomasa es una actividad que conlleva un costo significativo, por lo que es importante analizar cómo se podría mejorar la ejecución del mismo para que éste sea más eficiente en términos de cumplir con la precisión deseada a un costo mínimo (Emmer, 2007). En la actualidad, existe bastante información sobre la teoría de optimización del diseño de muestreo en inventarios forestales. Sin embargo, en la práctica normalmente no se dispone de todos los datos necesarios para aplicar esta teoría (*e.g.* datos colectados bajo un mismo protocolo, representatividad espacial y temporal, etc.) y resulta más sencillo diseñar cada inventario basándose en las experiencias obtenidas en los inventarios realizados en otros bosques con condiciones similares (*e.g.* clima, topografía, suelos, estadios sucesionales, estructura y edad de los bosques, entre otros) (Hughell, 1997).

De hecho, algunos estudios han incursionado en la técnica de simulación del muestreo utilizando datos propios, con el fin de construir curvas que permitan asociar el número de parcelas con la variabilidad o error en las estimaciones (Keller *et al.*, 2001; Sierra *et al.*, 2007; Wagner *et al.*, 2010), para posteriormente seleccionar la combinación que más se adapte a las necesidades del estudio. Sin embargo, ha sido común denominador que con este método se emplee la media estimada de la variable analizada, dejando de lado el comportamiento de los límites del intervalo, es decir, de los valores extremos asociados, los cuales podrían mostrar tendencias diferentes al presentado por la media e incidir notablemente en el error de las estimaciones.

En este sentido, uno de los principales retos que afrontan los proyectos relacionados con la cuantifi-

cación de la biomasa aérea y el carbono almacenado en los bosques naturales es la manera en la cual se cuantifican o estiman estas características del bosque de manera costo-efectiva (Gibbset *al.*, 2007; GOF-C-GOLD, 2008); es decir, cuál es el tamaño y número de parcelas óptimo para obtener alta precisión en las estimaciones (*i.e.*, bajos niveles de incertidumbres). La confiabilidad de los resultados dependerá de la escala y los métodos que se empleen para los cálculos (IPCC, 2003, 2006; GOF-C-GOLD, 2008).

En el presente estudio se describe un ejercicio realizado para determinar el tamaño y número de parcelas óptimo para estimar la biomasa aérea y los contenidos de carbono almacenados en bosques naturales de tierra firme de la Amazonia colombiana a escala local, con el fin de definir las incertidumbres asociadas al tamaño de la parcela utilizado para la estimación de la biomasa aérea. Para ello se empleó la información registrada en una parcela de 10ha, localizada en el PNN Amacayacu (Amazonas-Colombia). Con estos

datos se realizaron pruebas de independencia y una modelación estadística que permitió evaluar el efecto del tamaño y número de parcelas en la estimación de la biomasa aérea, e identificar el tamaño y número de parcelas más apropiado que permitirá, en el futuro, obtener estimados de biomasa aérea con bajos niveles de incertidumbre.

MÉTODOS

Área de estudio

El Parque Nacional Natural (PNN) Amacayacu se ubica al extremo sur de Colombia, en el denominado Trapezio Amazónico, el cual se encuentra delimitado al norte por el río Putumayo, al oriente por la frontera con Brasil, al occidente por la línea fronteriza con Perú, y al sur con el río Amazonas, límite natural entre Colombia y Perú (Figura 1). El PNN Amacayacu se encuentra en un área transicional, que incluye dos formaciones geológicas terciarias principales, la formación

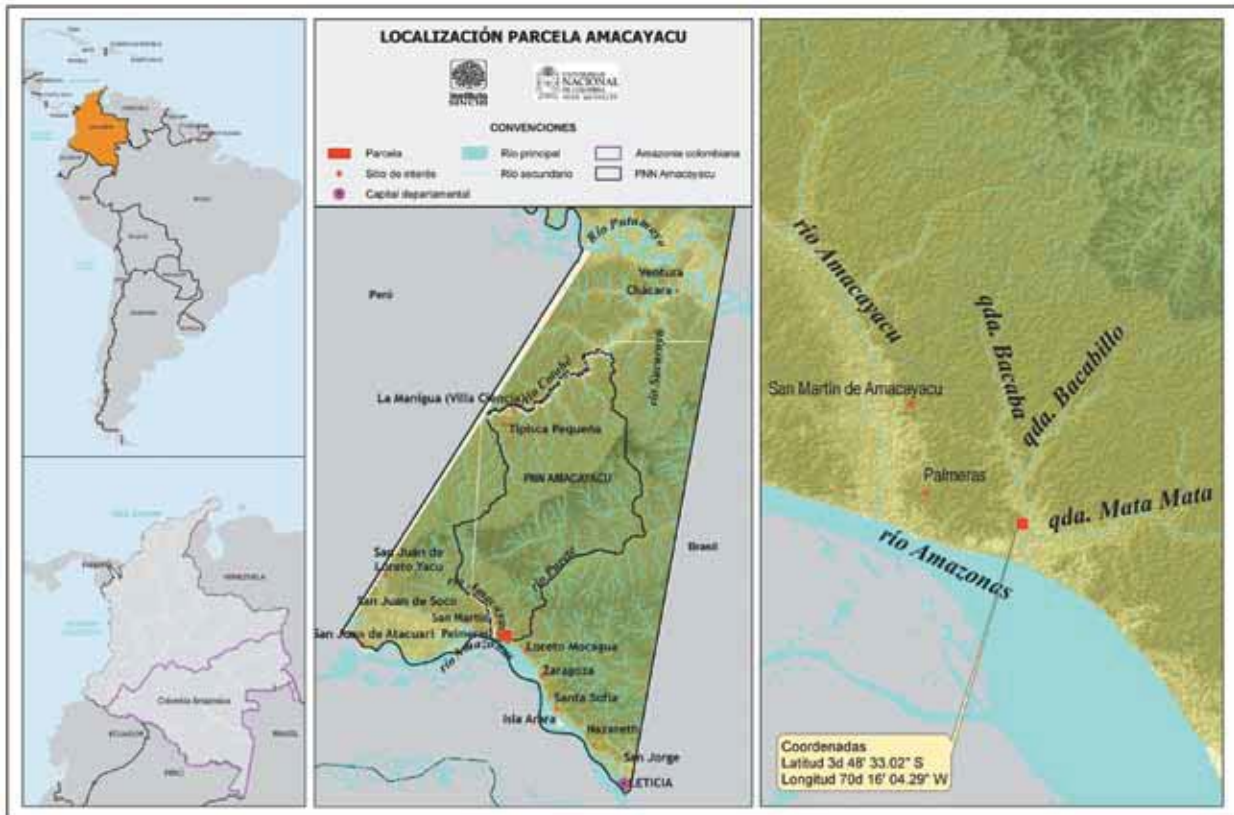


FIGURA 1. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.

Pebas, más reciente y de origen andino, y la formación Mariñame, derivada del escudo Guyanés, conformada por depósitos más antiguos de origen precámbrico (Hoorn, 1994ab). Geográficamente está ubicado en latitud: -3,80917 y longitud: -70,2679, con una altura de 82 m.s.n.m. (Palacios, 2005).

El área corresponde a la denominada zona de vida Bosque Húmedo Tropical (bh-T, Holdridge *et al.*, 1978). El clima se clasifica como húmedo tropical (Af) de acuerdo con la clasificación propuesta por Köppen (1936). El régimen de lluvias es bimodal, con una precipitación promedio anual de 3.023 mm y con un promedio mensual no inferior a los 100 mm, que lo define como no estacional. La temperatura mensual promedio es entre 24°C y 26°C. El relieve del terreno es ligeramente ondulado y uniforme.

INFORMACIÓN UTILIZADA

Para los análisis se empleó la información proveniente de diez hectáreas de la parcela permanente de Amacayacu, en donde se registró un total de 14.074 individuos que pertenecen a 1.053 especies arbóreas, agrupadas en 80 familias botánicas.

ANÁLISIS DE DATOS

Selección del tamaño de la submuestra. Empleando la información de 10ha de la parcela de Amacayacu, se seleccionaron de manera aleatoria tamaños de parcela más pequeños para, posteriormente, calcular el valor promedio de la biomasa aérea por hectárea en cada uno de estos casos. Se emplearon parcelas cuadradas que resultaron ser la mejor opción para evitar sesgos en el cálculo de la biomasa aérea, y, a su vez, permitían hacer uso de todo el conjunto de datos disponibles a través de un mismo árbol de análisis (Wagner *et al.*, 2010). El tamaño de las parcelas varió entre 0,01 y 1,0ha.

Cálculo de la biomasa aérea. El cálculo de la biomasa aérea (BA) se llevó a cabo empleando la ecuación para bosque húmedo tropical (bh-T) desarrollada por Álvarez *et al.* (en prep), que tiene como variables predictivas de la BA el diámetro (D) y la densidad de la madera (ρ ; g cm⁻³) (Ecuación 1). Este modelo permite estimar de manera más exacta las existencias de biomasa aérea para el caso de Colombia, en comparación con otros modelos comúnmente utilizados en estudios de biomasa (*e.g.* Brown *et al.*, 1989; Chave *et al.*, 2005; Zianis, 2008) (Álvarez *et al.*, en prep.).



Trampas para medir la cantidad de hojarasca

$$BA = \exp(2,828 - 1,596 \ln(D) + 1,236 (\ln(D))^2 - 0,126 (\ln(D))^3 + 0,441 \ln(\rho)) \quad [\text{Ecuación 1}]$$

Donde BA es la biomasa aérea (kg), D es el diámetro medido a 1,30 m de altura desde el suelo (cm), y ρ es la densidad específica de la madera (g cm^{-3}).

La información sobre densidad de la madera de las especies fue compilada de las bases de datos del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), el Centro de Investigación Tropical Smithsonian (STRI), Zanne *et al.* (2009) y Chave *et al.* (2006). A cada individuo se le asignó el valor de densidad reportado para la especie a la cual pertenece. Cuando esto no fue posible, se utilizó la densidad para el género, la familia o el promedio de la densidad de las especies registradas en cada parcela. Este procedimiento se llevó a cabo para cada uno de los tamaños de parcela considerados.

Cálculo de la biomasa aérea poblacional y análisis de simulación-bootstrap. La media poblacional de la biomasa aérea de toda la zona de interés se estimó con los valores calculados de la biomasa aérea por hectárea, empleando los diferentes tamaños de parcela. Posteriormente, se utilizó el procedimiento *bootstrap* para mostrar la relación entre el tamaño de parcela versus el porcentaje de error estándar asociado con la estimación de la biomasa aérea promedio. El resultado de este análisis permitió concluir qué tamaño de parcela y número de réplicas se debería establecer en un futuro, para alcanzar un determinado porcentaje de error asociado con la estimación de la biomasa aérea en el área de estudio.

El procedimiento de bootstrap realizado se sintetiza de la siguiente manera:

- Para cada tamaño de parcela seleccionado se determinó el número de parcelas necesario para cada caso.
- Se tomaron 10.000 muestras al azar del número de parcelas y del respectivo tamaño, anteriormente seleccionadas, y se calculó para cada muestra el porcentaje de error estándar.
- Las 10.000 simulaciones sirvieron para determinar el intervalo de confianza al 95% para el parámetro

estimado; en este caso, el porcentaje de error estándar de la estimación de la biomasa aérea.

- Este procedimiento se repitió para cada tamaño de muestra y de parcela.
- Finalmente, se obtuvieron gráficos en los cuales se resumen los resultados y se muestran los intervalos de confianza al 95%. En ellas, el eje X corresponde al número de parcelas, y el eje Y corresponde al porcentaje de error estándar.
- *Análisis de correlación espacial.* Inicialmente se realizó un análisis geo-estadístico para determinar el grado de posible auto-correlación espacial y establecer así el supuesto de independencia a la hora de seleccionar los distintos tamaños de parcelas en la muestra. El diagrama final permitió seleccionar el tamaño de muestra, de acuerdo a un porcentaje de error estándar, determinando tanto para el promedio como para el límite superior de la estimación.

RESULTADOS

Análisis de independencia espacial. Los análisis realizados demostraron que existe independencia espacial dentro de las 10 ha muestreadas en la parcela de Amacayacu (figura 2).

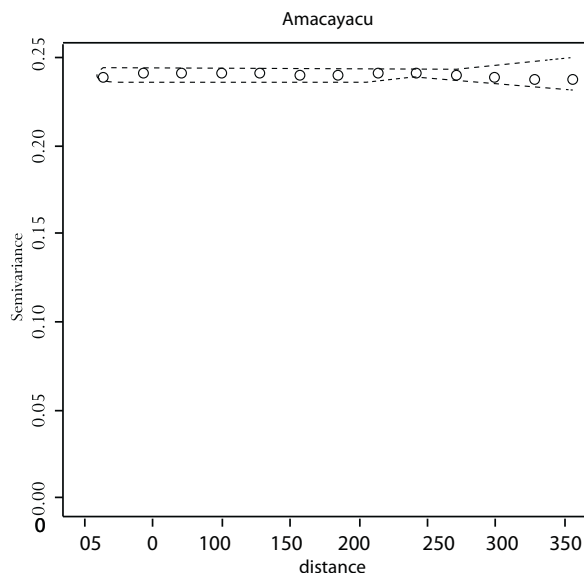


FIGURA 2. ANÁLISIS DE INDEPENDENCIA AL INTERIOR DE LA PARCELA DE AMACAYACU.

CUADRO ANEXO I. ANÁLISIS LOCAL BOSQUE HÚMEDO TROPICAL - NÚMERO DE PARCELAS Y PORCENTAJE DE ERROR ASOCIADO A LA ESTIMACIÓN DE LA BIOMASA AÉREA PROMEDIO, SEGÚN EL TAMAÑO DE LA UNIDAD MUESTRAL EMPLEADA (SIMULACIÓN REALIZADA CON LOS DATOS DE AMACAYACU).

| Numero Parcelas | 10x10 m (0,01 ha) | 20x20 m (0,04 ha) | 25x25 m (0,0625 ha) | 50x50 m (0,25 ha) | 100x100 m (1,0 ha) |
|-----------------|-------------------|-------------------|---------------------|-------------------|--------------------|
| 3 | 39,3739857 | 26,3174397 | 23,2563085 | 17,5999392 | 13,2685375 |
| 4 | 37,1923622 | 24,2634381 | 20,9820392 | 15,8191389 | 12,0084355 |
| 5 | 34,3453946 | 22,7332871 | 19,3285511 | 14,2252264 | 11,0525963 |
| 6 | 32,8190398 | 21,3212602 | 17,8081084 | 13,2075054 | 10,1328 |
| 7 | 30,6276412 | 19,693203 | 16,7964109 | 12,4931788 | 9,41925818 |
| 8 | 29,4264795 | 18,6624161 | 15,98898 | 11,49733 | 8,89515278 |
| 9 | 28,5039754 | 17,9504372 | 15,246977 | 11,0406098 | 8,3928372 |
| 10 | 27,4393194 | 16,979685 | 14,539386 | 10,4164269 | 7,93443784 |
| 11 | 26,3333533 | 16,409308 | 13,722659 | 9,88908779 | 7,57096591 |
| 12 | 25,0895455 | 15,8305998 | 13,2691647 | 9,48619837 | 7,2737959 |
| 13 | 24,5230222 | 15,2433411 | 12,7400913 | 9,1423964 | 6,98171027 |
| 14 | 24,0753989 | 14,8550448 | 12,3711549 | 8,8149864 | 6,74656433 |
| 15 | 23,1809753 | 14,330668 | 12,0245523 | 8,54451792 | 6,46577937 |
| 16 | 22,7381698 | 13,8571563 | 11,7069807 | 8,26035723 | 6,28700948 |
| 17 | 22,3794869 | 13,5340663 | 11,2434838 | 8,04348368 | 6,11205998 |
| 18 | 21,641278 | 13,1575766 | 11,0144347 | 7,83916245 | 5,93759381 |
| 19 | 21,1863153 | 12,8641606 | 10,7360885 | 7,62561456 | 5,78159998 |
| 20 | 20,7435524 | 12,6987912 | 10,5097165 | 7,43665665 | 5,62456055 |
| 21 | 20,3512229 | 12,1879473 | 10,2176686 | 7,28055759 | 5,5026064 |
| 22 | 19,9734255 | 11,97364 | 10,0239978 | 7,07647236 | 5,37765062 |
| 23 | 19,4649467 | 11,753131 | 9,78983019 | 6,98918944 | 5,24709726 |
| 24 | 19,2230084 | 11,5421799 | 9,60673033 | 6,76716513 | 5,16052314 |
| 25 | 18,8217216 | 11,3105005 | 9,49525294 | 6,63713772 | 5,05930009 |
| 26 | 18,5520426 | 11,167843 | 9,24211472 | 6,50591241 | 4,94731694 |
| 27 | 18,2796682 | 11,0372143 | 9,1632549 | 6,37584219 | 4,85930959 |
| 28 | 17,9162226 | 10,8525544 | 8,8737396 | 6,24271709 | 4,77320568 |
| 29 | 17,7557158 | 10,6635561 | 8,81635371 | 6,18862086 | 4,67576367 |
| 30 | 17,4332294 | 10,4559119 | 8,69706507 | 6,09292677 | 4,61690712 |
| 31 | 17,0460436 | 10,2281775 | 8,50587443 | 5,950787 | 4,55189457 |
| 32 | 16,98599 | 10,0351545 | 8,41293055 | 5,8494182 | 4,44820813 |
| 33 | 16,7988585 | 9,92332891 | 8,27955414 | 5,79657665 | 4,39880627 |
| 34 | 16,4327048 | 9,88127449 | 8,18074801 | 5,70127676 | 4,33216996 |
| 35 | 16,1894563 | 9,71113307 | 8,07141147 | 5,64041925 | 4,27025922 |
| 36 | 16,0187737 | 9,55085368 | 7,94766855 | 5,53518117 | 4,20679683 |
| 37 | 15,8299648 | 9,46704144 | 7,89521852 | 5,48663028 | 4,15145188 |
| 38 | 15,546794 | 9,31812843 | 7,74622016 | 5,42214824 | 4,0983516 |
| 39 | 15,5807586 | 9,21252869 | 7,64009687 | 5,34285644 | 4,05289625 |
| 40 | 15,3564397 | 9,14231259 | 7,53736985 | 5,25347971 | 4,00356896 |
| 41 | 15,1908877 | 9,04217438 | 7,47304225 | 5,20422891 | 3,94428885 |
| 42 | 14,9537579 | 8,93887038 | 7,3378286 | 5,1687156 | 3,90433317 |
| 43 | 14,8133347 | 8,7924454 | 7,29965435 | 5,09135448 | 3,85746104 |
| 44 | 14,7050198 | 8,69611954 | 7,22235326 | 5,03167611 | 3,81485005 |
| 45 | 14,5949648 | 8,58721507 | 7,12187456 | 4,97959798 | 3,75238123 |
| 46 | 14,3742621 | 8,54851615 | 7,03803308 | 4,92163754 | 3,72134314 |
| 47 | 14,251144 | 8,42732361 | 6,97268292 | 4,86030017 | 3,68715414 |
| 48 | 13,9767594 | 8,33388208 | 6,92660684 | 4,80750981 | 3,64401614 |
| 49 | 13,9119989 | 8,20983416 | 6,85557645 | 4,76381433 | 3,61584446 |

| Numero Parcelas | 10x10 m (0,01 ha) | 20x20 m (0,04 ha) | 25x25 m (0,0625 ha) | 50x50 m (0,25 ha) | 100x100 m (1,0 ha) |
|-----------------|----------------------|----------------------|------------------------|----------------------|-----------------------|
| 50 | 13,8348846 | 8,20568349 | 6,78358709 | 4,72233417 | 3,58187079 |
| 51 | 13,7379042 | 8,06986934 | 6,70158433 | 4,67713733 | 3,53754357 |
| 52 | 13,6580666 | 8,01003684 | 6,65472947 | 4,62721076 | 3,50677899 |
| 53 | 13,4716945 | 7,96618288 | 6,58782934 | 4,59332612 | 3,47121114 |
| 54 | 13,4604885 | 7,84737732 | 6,53188431 | 4,52705895 | 3,44670789 |
| 55 | 13,2770354 | 7,84672703 | 6,46698499 | 4,50983032 | 3,41223996 |
| 56 | 13,1581737 | 7,76948904 | 6,41504276 | 4,47487275 | 3,38038249 |
| 57 | 12,9204323 | 7,70773951 | 6,36388411 | 4,41281818 | 3,34433821 |
| 58 | 12,905626 | 7,66012375 | 6,29991985 | 4,3876532 | 3,32250909 |
| 59 | 12,7728592 | 7,5604929 | 6,24318285 | 4,3455493 | 3,28828132 |
| 60 | 12,7126075 | 7,49516647 | 6,18739096 | 4,29433631 | 3,26622932 |
| 61 | 12,6079136 | 7,41670694 | 6,11902617 | 4,28682943 | 3,23520915 |
| 62 | 12,4669292 | 7,40055186 | 6,10334979 | 4,23913929 | 3,20539178 |
| 63 | 12,4511145 | 7,31577455 | 6,05921757 | 4,19926615 | 3,18052715 |
| 64 | 12,3274746 | 7,28735023 | 6,01067635 | 4,16247879 | 3,1502249 |
| 65 | 12,3267265 | 7,23802225 | 5,94989436 | 4,14281754 | 3,13401801 |
| 66 | 12,1323485 | 7,16578338 | 5,92218265 | 4,11601141 | 3,11506055 |
| 67 | 12,1010575 | 7,07870001 | 5,86621179 | 4,09016298 | 3,08681939 |
| 68 | 12,0320612 | 7,08459537 | 5,83425616 | 4,04764204 | 3,06740158 |
| 69 | 11,9564925 | 7,0348158 | 5,77129394 | 4,02822695 | 3,04065357 |
| 70 | 11,8544762 | 6,96071823 | 5,75391714 | 3,98305388 | 3,02337899 |
| 71 | 11,7653525 | 6,94403931 | 5,71438844 | 3,96627818 | 2,99898126 |
| 72 | 11,6379461 | 6,87410381 | 5,6806609 | 3,93939858 | 2,97991616 |
| 73 | 11,6103824 | 6,79993262 | 5,64070481 | 3,91089641 | 2,95634049 |
| 74 | 11,4605945 | 6,77172907 | 5,60132506 | 3,8772584 | 2,94194152 |
| 75 | 11,4177757 | 6,74146983 | 5,56030289 | 3,84618907 | 2,92002673 |
| 76 | 11,3443652 | 6,7114385 | 5,53318432 | 3,82334174 | 2,89672767 |
| 77 | 11,2781952 | 6,62687464 | 5,47024909 | 3,79884332 | 2,87978443 |
| 78 | 11,2684803 | 6,6048333 | 5,45318802 | 3,76883722 | 2,86394208 |
| 79 | 11,1625918 | 6,56971518 | 5,42140297 | 3,75638827 | 2,84316329 |
| 80 | 11,1058329 | 6,50812469 | 5,37600667 | 3,74778985 | 2,83009565 |
| 81 | 10,9993326 | 6,46696316 | 5,33400982 | 3,71958082 | 2,80902958 |
| 82 | 11,0065088 | 6,42648191 | 5,29786348 | 3,69141848 | 2,79226301 |
| 83 | 10,9277075 | 6,39655884 | 5,28902223 | 3,6719277 | 2,7750763 |
| 84 | 10,8479098 | 6,37006238 | 5,28363855 | 3,64636133 | 2,75947242 |
| 85 | 10,8361296 | 6,3525017 | 5,22655218 | 3,62958252 | 2,73963115 |
| 86 | 10,6993849 | 6,29153562 | 5,18329509 | 3,59493442 | 2,72637438 |
| 87 | 10,6412517 | 6,27659853 | 5,16513346 | 3,58075503 | 2,71006281 |
| 88 | 10,6307452 | 6,23653836 | 5,1196129 | 3,55866271 | 2,69488484 |
| 89 | 10,58272 | 6,18882339 | 5,10015108 | 3,54386338 | 2,68150299 |
| 90 | 10,5005059 | 6,18131485 | 5,06873982 | 3,52475027 | 2,66295179 |
| 91 | 10,4660413 | 6,12244326 | 5,06991122 | 3,49981421 | 2,64905178 |
| 92 | 10,3681681 | 6,0926189 | 5,02653214 | 3,48579482 | 2,6341959 |
| 93 | 10,3547636 | 6,07577696 | 4,99596945 | 3,46789 | 2,62331835 |
| 94 | 10,2228672 | 6,01864218 | 4,97352863 | 3,44283878 | 2,61168013 |
| 95 | 10,2339697 | 6,01069354 | 4,94975336 | 3,42836938 | 2,59247422 |
| 96 | 10,1996877 | 5,97229067 | 4,92927551 | 3,41394109 | 2,57924481 |
| 97 | 10,1284025 | 5,94302016 | 4,91966704 | 3,4058165 | 2,56718553 |
| 98 | 10,1324716 | 5,91480156 | 4,88246331 | 3,37544569 | 2,55544826 |
| 99 | 10,022917 | 5,87152996 | 4,84352528 | 3,35501608 | 2,54127766 |

| Numero Parcelas | 10x10 m (0,01 ha) | 20x20 m (0,04 ha) | 25x25 m (0,0625 ha) | 50x50 m (0,25 ha) | 100x100 m (1,0 ha) |
|-----------------|----------------------|----------------------|------------------------|----------------------|-----------------------|
| 100 | 10,0139605 | 5,85955263 | 4,82307012 | 3,33971768 | 2,53015536 |
| 150 | 8,23925859 | 4,8035017 | 3,94695312 | 2,7343298 | 2,06388597 |
| 200 | 7,1203891 | 4,17443838 | 3,42247818 | 2,36649959 | 1,78905267 |
| 250 | 6,41771458 | 3,72593554 | 3,06731257 | 2,11768973 | 1,60061543 |
| 300 | 5,85467173 | 3,41342363 | 2,79256483 | 1,93655662 | 1,46091674 |
| 350 | 5,445577 | 3,1492363 | 2,59213678 | 1,79305859 | 1,35116913 |
| 400 | 5,08176739 | 2,95295031 | 2,42491432 | 1,67607128 | 1,26385215 |
| 450 | 4,79715662 | 2,77858814 | 2,28521332 | 1,57805931 | 1,19269674 |
| 500 | 4,54294545 | 2,64413744 | 2,16903581 | 1,49814654 | 1,13143283 |
| 600 | 4,15852348 | 2,41109213 | 1,97932124 | 1,36701083 | 1,03255834 |
| 800 | 3,6074911 | 2,09216205 | 1,71562636 | 1,18392938 | 0,89477245 |
| 1000 | 3,2294391 | 1,86920279 | 1,53441051 | 1,05935563 | 0,79998942 |
| 1200 | 2,94549193 | 1,70599383 | 1,40078491 | 0,96704714 | 0,73006817 |
| 1400 | 2,72703495 | 1,5806306 | 1,29643922 | 0,89521422 | 0,67600409 |
| 1600 | 2,5550834 | 1,47951281 | 1,21413556 | 0,83719083 | 0,63251514 |
| 1800 | 2,40777888 | 1,39490554 | 1,1439537 | 0,78965392 | 0,59604918 |
| 2000 | 2,28363258 | 1,32360603 | 1,08620967 | 0,74915898 | 0,5656276 |
| 2000 | 2,28478367 | 1,32328553 | 1,08560192 | 0,74932597 | 0,56559408 |
| 3000 | 1,86678352 | 1,08077586 | 0,88697256 | 0,6114314 | 0,4617948 |
| 4000 | 1,6160385 | 0,93686107 | 0,7680702 | 0,529515 | 0,39991296 |
| 5000 | 1,44608722 | 0,8374633 | 0,68673525 | 0,47380532 | 0,35767691 |

Biomasa aérea estimada. La biomasa aérea estimada para la parcela de Amacayacu es en promedio de 274,61 ha⁻¹, con valores máximos y mínimos de 241,09 y 298,97 ha⁻¹, respectivamente.

Análisis de simulación-*bootstrap*. Los ejercicios de simulación realizados arrojaron como principales resultados que existen diferencias entre las aproximaciones que solo incluyen el promedio de la biomasa aérea estimada y aquellas que incluyen el límite superior del intervalo de confianza (Anexo 1 y Anexo 2).

El porcentaje de variación del error es más alto para el límite superior de la estimación de la biomasa aérea que para el promedio de la misma. Esto se ve reflejado en el número de parcelas que se deben establecer para alcanzar el error deseado en cada caso, y también depende del tamaño de parcela que se emplee (Figura 3).

En general, se observó un marcado efecto del tamaño y número de parcelas sobre el porcentaje de error asociado a la estimación del promedio de la biomasa aérea y su límite superior. La distribución obtenida al emplear parcelas pequeñas presenta intervalos de

confianza del error más amplios, en comparación con parcelas grandes, donde los intervalos de confianza del error son más estrechos. Esto ocasiona que haya muy pocas diferencias entre el promedio de la biomasa aérea estimada y sus valores extremos (\pm intervalo de confianza o desviación estándar, al 95% de confianza).

Nuestros resultados indican que las parcelas de 0,25 a 1,0 ha son apropiadas para realizar las estimaciones de biomasa aérea eficientemente, a través del establecimiento de pocas unidades muestrales. No obstante, se observa que para alcanzar el error requerido en las estimaciones de carbono ($\pm 10\%$ con 95% de confianza), por ejemplo en proyectos forestales¹ (Emmer, 2007; Biocarbon Found, 2008; Rüginitz *et al.*, 2009), sería apropiado emplear un tamaño de parcela de 0,25 ha (50 m x 50 m). Este tamaño permite realizar estimaciones del promedio de la biomasa aérea y, por ende, de los contenidos de carbono asociados, con intervalos de confianza muy estrechos y comportamientos muy similares a los obtenidos cuando se emplean parcelas de 1,0 ha (Figura 2).

¹ En el caso de proyectos forestales denominados recientemente REDD, Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación de los bosques.

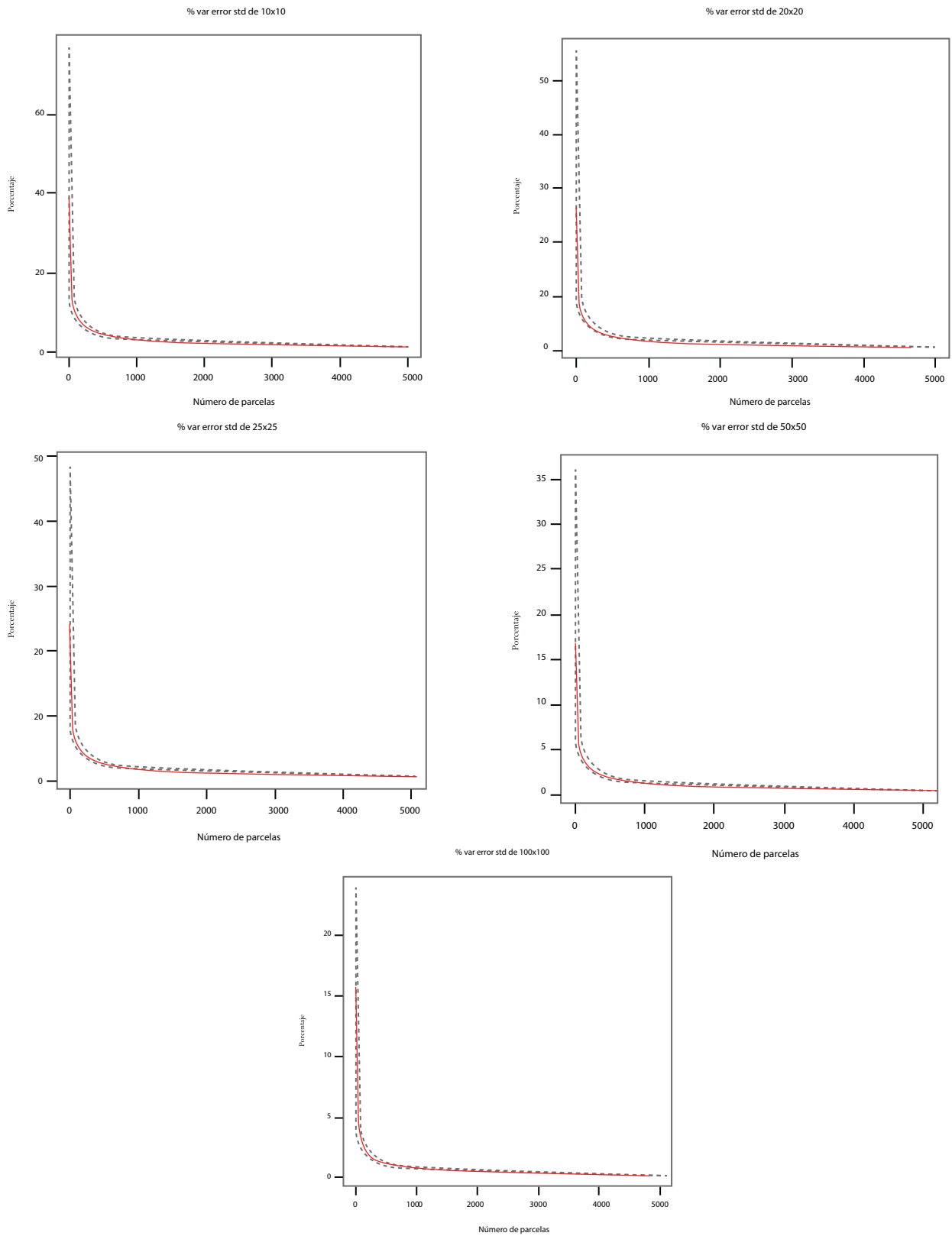


FIGURA 3. EFECTO DEL INCREMENTO EN EL NÚMERO DE PARCELAS SOBRE LA VARIACIÓN DEL PROMEDIO DE LA BIOMASA AÉREA Y SU LÍMITE SUPERIOR EMPLEANDO DIFERENTES TAMAÑOS DE PARCELA. LA VARIABILIDAD ES REPORTADA COMO EL PORCENTAJE DEL ERROR ASOCIADO A LAS ESTIMACIONES. LÍNEA CONTINUA CORRESPONDE AL PROMEDIO DE LA BIOMASA AÉREA ESTIMADA Y LAS LÍNEAS DISCONTINUAS AL LÍMITE SUPERIOR DE LA BIOMASA ESTIMADA.

Cuando se analizó el intervalo superior de las estimaciones de biomasa aérea, el error asociado fue mayor respecto al encontrado cuando se analiza el promedio de la biomasa aérea estimada, lo que hace que el número de parcelas a establecer aumente. Por otro lado, la relativa homogeneidad del terreno en cuanto a sus características biofísicas, que incide en el comportamiento de la biomasa aérea de los sitios, facilita que se puedan establecer parcelas de menor tamaño, siempre y cuando esto sea compensado con un mayor número de unidades muestrales para reducir el porcentaje de error asociado a las estimaciones (Figura 2).

En el Cuadro 1 se presenta un resumen del número de parcelas requerido para los diferentes tamaños de parcela seleccionados, que permite obtener errores en las estimaciones de $\pm 10\%$ y $\pm 20\%$ (con 95% de confianza).

DISCUSIÓN

Estimación de la biomasa aérea. La biomasa de los bosques amazónicos constituye un importante reservorio de carbono en el ciclo global de este elemento. No obstante, la biomasa aérea de estos bosques continúa siendo tema de discusión de muchas investigaciones, dado que aún existen incertidumbres asociadas a su estimación, que en muchos casos están relacionadas con los diferentes tamaños de parcela que se emplean para realizar este tipo de estudios (Keller *et al.*, 2001; Clark, 2007; Mahli *et al.*, 2002; Losos & Leigh, 2004) y con la representatividad espacial y temporal que tengan los datos registrados (Lewis *et al.*, 2009; Lloyd *et al.*, 2009).

En nuestro caso pudimos establecer que, al menos para los bosques de tierra firme bien conservados de la Amazonia colombiana, parcelas de 0,25 ha son apropiadas para realizar las estimaciones de biomasa aérea y de los contenidos de carbono asociados eficientemente, a través del establecimiento de pocas réplicas (n). Otros trabajos realizados en la Amazonia peruana y brasilera han demostrado que parcelas de 0,25 ha funcionan muy bien en este tipo de bosques (Keller *et al.*, 2001; Chave *et al.*, 2003).

No obstante, es importante resaltar que nuestros resultados deberán ser validados con pruebas de campo en otros bosques de tierra firme diferentes a los de

Amacayacu, con el fin de evaluar si aspectos topográficos, climáticos, tamaño de los parches de bosque y, en general, aspectos biofísicos, en algún momento pueden ser limitantes para el establecimiento de parcelas de este tamaño en el caso de la Amazonia colombiana.

El tamaño de parcela propuesto y su efecto sobre la estimación de la biomasa aérea requiere, también, ser evaluado en otros tipos de bosques, como los inundables, de galería y riparios, que también hacen parte de la Amazonia colombiana y para los cuales no se contó con información disponible para realizar los análisis en este estudio.

Es importante resaltar, además, que aunque el tamaño de parcela recomendado es de 0,25 ha, esto no quiere decir que tamaños de parcela más pequeños no se puedan utilizar. En estos casos se debe tener presente que si se establecen parcelas de menor tamaño, ello requerirá un mayor esfuerzo de muestreo, es decir, del establecimiento de un mayor número de réplicas (n) (ver Anexo 2).

Cabe anotar que los inventarios forestales y/o florísticos que hasta ahora se han realizado en la Amazonia colombiana se han caracterizado por el uso de parcelas de 0,1 ha (Duivenvoorden, 1994, 1995; Duque, 2002; Phillips & Von Hildebrand, 2002; Cárdenas, en prep.), en los cuales el número de réplicas ha sido relativamente alto (≥ 30 parcelas). Esto concuerda con nuestros resultados de modelación, donde se indica que el uso de parcelas de 0,0625 ha ó 0,1 ha requiere el establecimiento de 23 a 39 réplicas (n), dependiendo del criterio que se emplee para la selección de las mismas, es decir, del promedio o del límite superior de la estimación de la biomasa aérea (Cuadro 1).

A diferencia de los resultados reportados por Keller *et al.* (2001), Sierra *et al.* (2009) y otros investigadores, nosotros sugerimos emplear como criterio de selección para determinar el número de parcelas o réplicas (n) el límite superior de la estimación de la biomasa aérea, con el fin de obtener la precisión deseada en las estimaciones de biomasa aérea y ser conservadores al momento de reportar los valores de contenidos de carbono asociados. Esto aplica para cualquier tamaño de parcela que se seleccione de acuerdo con los tamaños acá propuestos.

CUADRO I. TAMAÑO DE PARCELA Y NÚMERO DE UNIDADES MUESTRALES PARA ALCANZAR EL ERROR REQUERIDO (CON 95% DE CONFIANZA) EN LAS ESTIMACIONES DE BIOMASA AÉREA.

| Error requerido (%) | Estimación | Tamaño parcela (ha) | | | | |
|---------------------|------------|---------------------|------|--------|------|-----|
| | | 0,01 | 0,04 | 0,0625 | 0,25 | 1,0 |
| ± 10 | Media | 150 | 33 | 23 | 11 | 7 |
| | Lim. Sup. | 200 | 58 | 39 | 20 | 11 |
| ± 20 | Media | 22 | 7 | 5 | 3 | 3 |
| | Lim. Sup. | 48 | 19 | 13 | 8 | 3 |

CUADRO ANEXO 2. ANÁLISIS LOCAL BOSQUE HÚMEDO TROPICAL - NÚMERO DE PARCELAS Y PORCENTAJE DE ERROR ASOCIADO A LA ESTIMACIÓN DEL LÍMITE SUPERIOR DE LA BIOMASA AÉREA, SEGÚN EL TAMAÑO DE LA UNIDAD MUESTRAL EMPLEADA (SIMULACIÓN REALIZADA CON LOS DATOS DE AMACAYACU).

| Numero Parcelas | 10x10 m (0,01 ha) | 20x20 m (0,04 ha) | 25x25 m (0,0625 ha) | 50x50 m (0,25 ha) | 100x100 m (1,0 ha) |
|-----------------|-------------------|-------------------|---------------------|-------------------|--------------------|
| 3 | 76,9081354 | 55,6336003 | 48,5716205 | 36,1639827 | 23,88193 |
| 4 | 70,9286457 | 48,09254 | 41,5133343 | 29,7187652 | 19,168571 |
| 5 | 64,7796481 | 42,6893337 | 36,7683019 | 24,4526955 | 16,0612883 |
| 6 | 59,6319483 | 38,362096 | 31,4338399 | 22,0353406 | 14,1264412 |
| 7 | 55,4535449 | 35,8421384 | 29,4352948 | 20,21367 | 12,8346291 |
| 8 | 52,7789479 | 32,9526794 | 26,7326749 | 17,7361601 | 11,7621994 |
| 9 | 50,3063157 | 30,3492017 | 25,2667761 | 16,7079837 | 10,8960391 |
| 10 | 48,8940419 | 28,7732272 | 23,7452561 | 15,6403413 | 10,1624797 |
| 11 | 46,487525 | 27,0829052 | 21,5946695 | 14,4392999 | 9,56759964 |
| 12 | 42,1653993 | 26,0339746 | 20,9667541 | 13,7542316 | 9,04284924 |
| 13 | 40,7157389 | 24,6746607 | 19,419934 | 12,9931667 | 8,68077599 |
| 14 | 39,5830897 | 23,6261247 | 18,9883155 | 12,5467847 | 8,30048027 |
| 15 | 38,3573857 | 22,5653127 | 18,0357278 | 11,9427514 | 7,94291169 |
| 16 | 37,0959211 | 21,9995164 | 17,1767879 | 11,4106374 | 7,64040235 |
| 17 | 37,1420644 | 21,2075835 | 16,4114773 | 10,9486627 | 7,41310175 |
| 18 | 34,9079227 | 20,5751059 | 15,8924 | 10,5340879 | 7,07244543 |
| 19 | 34,515071 | 19,6918499 | 15,3488373 | 10,188049 | 6,8939969 |
| 20 | 32,9638016 | 19,5213006 | 15,2537566 | 9,92754304 | 6,6787171 |
| 21 | 31,916217 | 18,6292071 | 14,4581668 | 9,61246205 | 6,51020923 |
| 22 | 31,7111899 | 18,2116092 | 14,0567013 | 9,33979743 | 6,29431288 |
| 23 | 30,2946535 | 17,2541402 | 13,7592092 | 9,177107 | 6,18625204 |
| 24 | 30,1784044 | 17,3412786 | 13,2931818 | 8,9392534 | 6,02126385 |
| 25 | 29,5689749 | 16,6977394 | 13,1335243 | 8,54837681 | 5,92610388 |
| 26 | 28,1433068 | 16,1464767 | 12,5932609 | 8,49647827 | 5,749587 |
| 27 | 27,9329504 | 16,3486198 | 12,5618607 | 8,18334346 | 5,6474022 |
| 28 | 27,3117285 | 15,8510914 | 12,1855966 | 8,00102913 | 5,52319463 |
| 29 | 26,9479367 | 15,501745 | 11,7804572 | 7,85705186 | 5,42112029 |
| 30 | 26,2918234 | 15,0944753 | 11,5717067 | 7,73060645 | 5,29794478 |
| 31 | 25,8230242 | 14,8296233 | 11,3995484 | 7,54700583 | 5,21652464 |
| 32 | 25,3358905 | 14,2031048 | 11,3493846 | 7,36967234 | 5,09540125 |
| 33 | 24,8515835 | 13,9324514 | 11,0502317 | 7,31185595 | 5,04018535 |
| 34 | 24,3517713 | 13,9883957 | 10,8058197 | 7,17374339 | 4,954298 |
| 35 | 23,8754002 | 13,803423 | 10,6040704 | 7,11503246 | 4,86784551 |
| 36 | 23,8697647 | 13,376129 | 10,5346333 | 6,88587161 | 4,77227469 |
| 37 | 23,1171164 | 13,0665528 | 10,3615359 | 6,82989461 | 4,70361208 |
| 38 | 22,9139308 | 12,9505404 | 10,1517922 | 6,73771016 | 4,6548595 |
| 39 | 22,6843531 | 12,6237528 | 9,95847463 | 6,63620776 | 4,58773732 |

| Numero Parcelas | 10x10 m (0,01 ha) | 20x20 m (0,04 ha) | 25x25 m (0,0625 ha) | 50x50 m (0,25 ha) | 100x100 m (1,0 ha) |
|-----------------|-------------------|-------------------|---------------------|-------------------|--------------------|
| 40 | 22,3090048 | 12,5685456 | 9,79401413 | 6,48269143 | 4,47863228 |
| 41 | 21,9493092 | 12,5111919 | 9,67929491 | 6,3936675 | 4,46042018 |
| 42 | 21,7425055 | 12,2721195 | 9,47642646 | 6,31025165 | 4,41619897 |
| 43 | 21,1490208 | 12,0050294 | 9,3095543 | 6,2537968 | 4,34590822 |
| 44 | 20,8446375 | 11,7274759 | 9,21912559 | 6,10501889 | 4,28037176 |
| 45 | 20,62216 | 11,6085773 | 9,10230529 | 6,08232563 | 4,21173942 |
| 46 | 20,4631138 | 11,5105834 | 9,0135381 | 6,03169497 | 4,17958295 |
| 47 | 20,1291988 | 11,4180249 | 8,84194397 | 5,89268367 | 4,11793779 |
| 48 | 19,5416895 | 11,1434731 | 8,78247442 | 5,82631454 | 4,06890394 |
| 49 | 19,4882076 | 10,9747623 | 8,67837825 | 5,73444593 | 4,02515921 |
| 50 | 19,3780307 | 10,8028066 | 8,58731456 | 5,73599335 | 3,99778581 |
| 51 | 19,2393653 | 10,7768933 | 8,43947501 | 5,62859432 | 3,95401948 |
| 52 | 19,1600332 | 10,5873342 | 8,34604968 | 5,58106017 | 3,90244354 |
| 53 | 18,4404981 | 10,5827075 | 8,35228008 | 5,50847785 | 3,85472682 |
| 54 | 18,9718648 | 10,277818 | 8,10186618 | 5,41871889 | 3,80474533 |
| 55 | 18,3083564 | 10,3256896 | 8,06050466 | 5,37859705 | 3,7717666 |
| 56 | 18,0992008 | 10,3098637 | 7,92305674 | 5,34624234 | 3,73832343 |
| 57 | 17,5045008 | 10,177947 | 7,94622758 | 5,22239065 | 3,70339176 |
| 58 | 17,5173856 | 9,97086895 | 7,86161097 | 5,24436293 | 3,67701186 |
| 59 | 17,5627953 | 9,84170225 | 7,72102138 | 5,14368492 | 3,63811737 |
| 60 | 17,3016071 | 9,77521551 | 7,61550008 | 5,12812353 | 3,60324063 |
| 61 | 17,1760566 | 9,46472884 | 7,56183399 | 5,07195258 | 3,5651499 |
| 62 | 16,8218 | 9,5880855 | 7,58268063 | 5,03903574 | 3,53957068 |
| 63 | 16,8965271 | 9,49103187 | 7,44475415 | 4,99251001 | 3,49257055 |
| 64 | 16,5811251 | 9,41063014 | 7,32992324 | 4,93571154 | 3,47340828 |
| 65 | 16,452816 | 9,2405563 | 7,26575519 | 4,87176227 | 3,45693384 |
| 66 | 16,3943898 | 9,16417792 | 7,25286518 | 4,88077313 | 3,41855312 |
| 67 | 16,2648813 | 9,12522295 | 7,17946498 | 4,79218394 | 3,37403246 |
| 68 | 16,1086526 | 9,06426495 | 7,11253852 | 4,7584676 | 3,37074808 |
| 69 | 15,9081014 | 8,99596027 | 7,03330442 | 4,71521071 | 3,33622563 |
| 70 | 15,8031822 | 8,86243374 | 7,05261532 | 4,66712882 | 3,30167337 |
| 71 | 15,5829246 | 8,88598406 | 7,01611279 | 4,65168315 | 3,28858825 |
| 72 | 15,4297879 | 8,81931344 | 6,92616533 | 4,61744139 | 3,27033835 |
| 73 | 15,3829503 | 8,57448907 | 6,84318315 | 4,56334791 | 3,23831054 |
| 74 | 14,9649123 | 8,56257111 | 6,76881176 | 4,52390637 | 3,21483331 |
| 75 | 15,0524338 | 8,58959761 | 6,73196575 | 4,48535728 | 3,19040256 |
| 76 | 14,9707938 | 8,53230392 | 6,68618453 | 4,47187657 | 3,16766899 |
| 77 | 14,928677 | 8,41623346 | 6,6106935 | 4,40346866 | 3,13612871 |
| 78 | 14,6473892 | 8,31540294 | 6,5729051 | 4,38533673 | 3,12744514 |
| 79 | 14,5430381 | 8,21926051 | 6,54424909 | 4,36616522 | 3,08957876 |
| 80 | 14,4183422 | 8,16249684 | 6,46280773 | 4,35688545 | 3,09555075 |
| 81 | 14,5709046 | 8,11864565 | 6,41703752 | 4,35052291 | 3,06805001 |
| 82 | 14,2962194 | 8,07964064 | 6,31246361 | 4,29884323 | 3,0452944 |
| 83 | 14,2823005 | 7,89851566 | 6,32889235 | 4,26994421 | 3,01195744 |
| 84 | 14,1899846 | 8,05894314 | 6,30160468 | 4,21725119 | 3,0077091 |
| 85 | 14,0442673 | 7,90799428 | 6,28810119 | 4,19841294 | 2,98386156 |
| 86 | 13,7883219 | 7,86795897 | 6,24473781 | 4,14711946 | 2,96192017 |
| 87 | 13,7363936 | 7,81408889 | 6,19055754 | 4,13188923 | 2,95875264 |
| 88 | 13,7926787 | 7,73934426 | 6,10364849 | 4,10699237 | 2,93864377 |

| Numero Parcelas | 10x10 m (0,01 ha) | 20x20 m (0,04 ha) | 25x25 m (0,0625 ha) | 50x50 m (0,25 ha) | 100x100 m (1,0 ha) |
|-----------------|----------------------|----------------------|------------------------|----------------------|-----------------------|
| 89 | 13,776208 | 7,70073395 | 6,10807697 | 4,08338236 | 2,90748075 |
| 90 | 13,5077873 | 7,69181637 | 6,03553375 | 4,05903093 | 2,88330765 |
| 91 | 13,4040133 | 7,5697612 | 5,98563512 | 4,00768591 | 2,87845096 |
| 92 | 13,3585045 | 7,576783 | 6,0017344 | 4,01290969 | 2,85925323 |
| 93 | 13,2844527 | 7,51253492 | 5,92106275 | 3,96497086 | 2,83897182 |
| 94 | 13,0238715 | 7,39727819 | 5,93894482 | 3,94775583 | 2,82582353 |
| 95 | 13,0236092 | 7,4075047 | 5,84207846 | 3,94223564 | 2,80835812 |
| 96 | 12,9330327 | 7,30933378 | 5,83886651 | 3,91567157 | 2,79745399 |
| 97 | 12,9412624 | 7,28913077 | 5,77382308 | 3,8922901 | 2,77420713 |
| 98 | 12,9764272 | 7,26113248 | 5,82311016 | 3,86283103 | 2,76222011 |
| 99 | 12,8485947 | 7,24676876 | 5,70425211 | 3,84948483 | 2,74874099 |
| 100 | 12,7342852 | 7,19678604 | 5,71524949 | 3,8168103 | 2,73822628 |
| 150 | 10,0781413 | 5,6948473 | 4,53711574 | 3,05208942 | 2,20059436 |
| 200 | 8,45653747 | 4,87038506 | 3,84867971 | 2,61787027 | 1,89492742 |
| 250 | 7,53149324 | 4,24967115 | 3,40886347 | 2,3157769 | 1,68087099 |
| 300 | 6,76934845 | 3,85500964 | 3,09283506 | 2,09450831 | 1,52882161 |
| 350 | 6,18316636 | 3,53023514 | 2,847806 | 1,92920256 | 1,4105498 |
| 400 | 5,76114618 | 3,27750413 | 2,63974553 | 1,79392215 | 1,31778375 |
| 450 | 5,37983389 | 3,07179039 | 2,47279394 | 1,68360096 | 1,23794461 |
| 500 | 5,0809432 | 2,91000401 | 2,34363212 | 1,5964575 | 1,17248305 |
| 600 | 4,60142906 | 2,63008034 | 2,11794182 | 1,44765093 | 1,06545117 |
| 800 | 3,9421197 | 2,25772034 | 1,82231681 | 1,24411755 | 0,9200081 |
| 1000 | 3,50961729 | 1,9947957 | 1,62494416 | 1,1080977 | 0,81977205 |
| 1200 | 3,16124489 | 1,81219581 | 1,47158343 | 1,00896752 | 0,74738508 |
| 1400 | 2,9216473 | 1,67467727 | 1,35735661 | 0,92825112 | 0,69069861 |
| 1600 | 2,72867171 | 1,55844487 | 1,26565959 | 0,86634671 | 0,64461937 |
| 1800 | 2,55642482 | 1,46417948 | 1,1936155 | 0,81578211 | 0,60741315 |
| 2000 | 2,42081989 | 1,39077596 | 1,12828861 | 0,77283538 | 0,57592371 |
| 2000 | 2,41273757 | 1,38803053 | 1,13216126 | 0,77373261 | 0,5760727 |
| 3000 | 1,95798065 | 1,12390344 | 0,91596092 | 0,62675557 | 0,46863359 |
| 4000 | 1,68306409 | 0,96861624 | 0,78979609 | 0,54087941 | 0,40483003 |
| 5000 | 1,50168354 | 0,86265939 | 0,70379824 | 0,48323903 | 0,36165421 |



Vellucias

Aplicación de los resultados en el contexto nacional e internacional. Nuestros resultados constituyen uno de los primeros esfuerzos en el país por estandarizar la forma en la que se estima la biomasa aérea y los contenidos de carbono asociados a los bosques de tierra firme de la Amazonia colombiana. Adicionalmente, establecen un punto de partida importante para minimizar las incertidumbres asociadas con la estimación de estas variables, en lo relacionado con el uso de tamaño de parcela homogéneo, y la representatividad espacial de las réplicas en la región amazónica.

Parcelas cuadradas con tamaños de 0,25 ha permitirán obtener en el futuro estimaciones de biomasa aérea y carbono con errores de $\pm 10\%$ (intervalos de confianza estrechos), a partir del establecimiento de pocas réplicas. Las parcelas podrán ser establecidas de manera temporal o permanente según las características, alcances y necesidades de proyectos de investigación o consultoría, que requieran estimaciones confiables de carbono (*e.g.* reducción de emisiones por deforestación y degradación de bosques, conservación y manejo sostenible de los bosques, y/o captura del CO₂ por medio del crecimiento de la vegetación secundaria existente).

Estos resultados concuerdan, además, con lo reportado en otros estudios internacionales (Keller *et al.*, 2001; Chave *et al.*, 2003; Wagner *et al.*, 2010), en los cuales se resalta que el establecimiento aleatorio de parcelas de 0,25 ha permite tener una muestra representativa de la biomasa aérea y otras variables estructurales (*e.g.* distribuciones diamétricas, área basal) de los bosques amazónicos. Adicionalmente, estudios recientes han reportado que parcelas con estas caracte-

rísticas podrían en el futuro ser articuladas con datos de sensores remotos para generar modelos de deforestación y carbono a escalas regionales y de carácter predictivo (WHRC, 2009), que permitan formular acciones de contingencia para la conservación y uso sostenible de estos ecosistemas.

Lo anterior indica que es necesario realizar ejercicios de modelación y validación similares para las otras regiones de Colombia, con el fin de identificar si parcelas de 0,25 ha son apropiadas para la estimación de la biomasa aérea en bosques con otras características estructurales. Estos ejercicios permitirían en el futuro diseñar estrategias de muestreo regionales que posibiliten el monitoreo regular de los bosques naturales en el país, generar información importante y necesaria para los reportes nacionales que se deben realizar a la FAO (Organización para la Agricultura y la Alimentación) y a la UNFCCC (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático), y para la toma de decisiones políticas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus más sinceros agradecimientos al profesor Kenneth Cabrera (Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín), por su asesoría y recomendaciones en el análisis estadístico de los datos, y a los biólogos Juan Fernando Phillips y Diego Alejandro Navarrete, por sus oportunas sugerencias y comentarios al manuscrito. Al Center for Tropical Forest Science (CTFS) por su valiosa asesoría y colaboración. De igual manera, a todos aquellos que de uno u otro modo colaboraron con el desarrollo de este trabajo, y que aquí no se mencionan por cualquier motivo.

BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez E., A. J. Duque, J. G. Saldarriaga, K. Cabrera, G. de las Salas, J. I. del Valle, F. H. Moreno, S. Orrego, L. Rodríguez. En prep. Tree allometric biomass equations along a complex environmental gradient in tropical forests of Colombia: a test to pantropical models.
- Biocarbon Fund. 2008. Methodology for Estimating Reductions of GHG Emissions from Mosaic Deforestation. RED-NM-001 / Versión 01. p.111.
- Brown S., A. Gillespie, A. E. Lugo. 1989. Biomass estimation methods for tropical forest with applications to forest inventory data. *Forest Science* 35: 881-902.
- Cárdenas D, J. F. Phillips, A. J. Duque, J. F. Duivenvoorden. En prep. Distribución de la biomasa aérea en la Amazonia colombiana.
- Chave J, R. Condit, S. Lao, J. P. Caspersen, R. B. Foster, S. P. Hubbel. 2003. Spatial and temporal variation of biomass in a tropical forest: results from a large census plot in Panama. *Journal of Ecology* 91: 240-252.
- Chave J, C. Andalo, S. Brown, A. Cairns, J. Q. Chambers, H. Folster, F. Fromard, N. Higuchi, T. Kira, J. P. Lescure, B. W. Nelson, H. Ogawa, H. Puig, B. Riera, T. Yamakura. 2005. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia* 145: 87-9.
- Chave J., H. C. Muller-Landau, T. R. Baker, T. A. Easdale, H. Ter Steege, CO Webb. 2006. Regional and phylogenetic variation of wood density across 2456 Neotropical tree species. *Ecological Applications* 16(6): 2356-2367.
- Clark D. A. 2007. Detecting tropical forests' responses to global climatic and atmospheric change: Current challenges and a way forward. *Biotropica* 39: 4-19.
- Duivenvoorden J. F. 1994. Vascular plant species counts in the rain forest of the Middle Caquetá area, Colombian Amazonia. *Biodiversity and Conservation* 3: 685-715.
- Duivenvoorden J. F. 1995. Tree species composition and rain forest-environment relationships in the middle Caquetá area, Colombia, NW Amazonia. *Vegetation* 120: 91-113.
- Duque A. J., M. Sánchez, J. Cavalier, J. F. Duivenvoorden. 2002. Different floristic patterns of woody understorey and canopy plants in Colombian Amazonia. *Journal of Tropical Ecology* 18: 1-27.
- Emmer I. 2007. Manual de contabilidad de carbono y diseño de proyectos. Proyecto Encofor. Quito, Ecuador. 22 p.
- Gibbs H. K., B. Brown, J. O. Niles, J. A. Foley. 2007. Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: making REDD a reality. *Environmental Research Letters* 2(4): 045023 (13pp) -doi:10.1088/1748-9326/2/4/045023.
- Gofc-Gold (Global Observation of Forest and Land Cover Dynamics). 2009. Reducing greenhouse gas emissions from deforestation and 46 degradation in developing countries: a sourcebook of methods and procedures 47 for monitoring, measuring and reporting, Gofc-Gold Report version COP14-2, 48 (Gofc-Gold Project Office, Natural Resources Canada, Alberta, Canada). p.197.
- Holdridge, L. R. 1978. Life Zone Ecology. Tropical Science Center. San José, Costa Rica. p. 216.
- Hoorn, C. 1994a. An environmental reconstruction of the palaeo-Amazon River system (Middle to late Miocene, NW Amazonia). *Palaeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 112: 187-238.
- Hoorn, C. 1994b. Fluvial Palaeoenvironments in the Intercratonic Amazonas Basin (Early Miocene to Early Middle Miocene, Colombia). *Palaeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 109: 1-55.
- Hughell, D. A. 1997. La Optimización de Inventarios Forestales. Proyecto BOLFOR. Calle Prolongación Beni 149 Santa Cruz, Bolivia. USAID Contrato: 511-0621-C-00-3027. Tropical Research & Development. p. 58.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2003. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme, Institute for Global Environmental Strategies (IGES). p. 610.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. y Tanabe K. (Eds). Published by: IGES, Japón.
- Keller, M., M. Palace, G. Hurtt. 2001. Biomass estimation in the Tapajos National forest, Brazil: examination of sampling and allometric uncertainties. *Forest Ecology and Management* 154: 371-382.
- Köppen, W. 1936. Das Geographische System der Klimate. Handbuch der Klimatologie, Volume 1, Part C. Berlin. (In German). p. 388.
- Lewis, S. L., G. López-González, B. Sonke, K. Affum-Baffoe, T. R. Baker, L. Lloyd, U. E. Gloor, S. L. Lewis. 2009. Are the dynamics of tropical forests dominated by large and rare disturbance events? *Ecology Letters* 12: E19-E21.
- Losos, E., E. Leigh. 2004. Tropical forest diversity and dynamism: Findings from a large-scale plot network. University of Chicago Press, Chicago, Illinois.
- Mahli, Y., OL Phillips, J. Lloyd, T Baker, J. Wright, S Almeida, L Arroyo, T. Frederiksen. 2002. An international network to monitor the structure, composition and dynamics of Amazonian forests (RAINFOR). *Journal of Vegetation Science* 13: 439-450.
- Palacios, P. 2005. Patrones estructurales y distribución espacial de poblaciones de *Brosimum rubescens* Taub en relación con la variabilidad fisiográfica en la ribera colombiana del río Amazonas. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Colombia. Leticia, Colombia.

- Phillips, J. F., P. von Hildebrand. 2002. Distribución espacial y características de los bosques en la cuenca de Puerto Abeja, Parque Nacional Natural Serranía de Chiribiquete. En: UAESPNN & Fundación Puerto Rastrojo (Eds.). Plan de manejo para el Parque Nacional Natural Serranía de Chiribiquete. Bogotá, Colombia.
- Rügnitz, M. T., M. L. Chacón, R. Porro. 2009. Guía para la Determinación de Carbono en Pequeñas Propiedades Rurales. Manual Técnico No. 11. Lima, Perú. Centro Mundial Agroforestal (ICRAF)/Consorcio Iniciativa Amazônica (IA). p. 79.
- Sierra, C. A., J. I. del Valle, SA Orrego, FH Moreno, MA Harmon, M Zapata, GJ Colorado, MA Herrera, W Lara, DE Restrepo, LM Berrouet, LM Loaiza, JF Benjumea. 2007. Total carbon stocks in a tropical forest landscape of the Porce region, Colombia. *Forest Ecology and Management* 243: 299-309.
- Wagner, F., E. Rutishauser, L. Blanch, B. Herault. 2010. Effects of Plot Size and Census Interval on Descriptors of Forest Structure and Dynamics. *Biotropica*: 42(6):664-671.
- Woods Hole Research Center (WHRC). 2009. WHRC Protocol: Field Measurements and Data Collection. Unpublished.
- Zanne, A. E., G. López-González, D. A. Coomes, J. Ilic, S. Jansen, S. L. Lewis, R. B. Miller, N. G. Swenson, M. C. Wiemann, J. Chave. 2009. Data from: Towards a worldwide wood economics spectrum. *Ecology Letters* 12: 351-366.
- Zianis, D. 2008. Predicting mean aboveground forest biomass and its associated variance *Forest Ecology and Management* 256(6): 1400-1407.



Mediciones de arboles