



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

**Gestión del monte: servicios
ambientales y bioeconomía**

26 - 30 junio 2017 | Plasencia
Cáceres, Extremadura

7CFE01-082

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Plasencia. Cáceres, Extremadura. 26-30 junio 2017
ISBN 978-84-941695-2-6

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Propagación de errores en el inventario de biomasa en bosques naturales: efecto de las distintas fuentes de incertidumbre

PÉREZ-CRUZADO, C.^{1,2}, ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J.G.¹, MAGDON, P.², SARODJA, D.², FEHRMANN, L.² y KLEINN, C.²

¹ Departamento de Ingeniería Agroforestal, Escuela Politécnica Superior de Lugo, Universidad de Santiago de Compostela.

² Department of Forest Inventory and Remote Sensing, Georg-August Universität Göttingen (Alemania).

Resumen

La mejora de la precisión de los inventarios forestales ha adquirido una elevada importancia en los últimos años, debido a que los mecanismos internacionales en vigor para la compensación de emisiones de carbono otorgan un mayor precio a los proyectos estimados con menor incertidumbre. En este contexto, los inventarios forestales pasan a ser un instrumento que aporta valor añadido a una determinada región o país para el comercio de créditos de carbono, y el control de su incertidumbre se hace indispensable. En el presente trabajo se estudian y cuantifican las distintas fuentes de error en inventarios forestales a escala amplia en bosques naturales. Para las condiciones del caso estudiado, el factor que más contribuye a la incertidumbre total es la elección del modelo de estimación de biomasa, seguido del modelo altura-diámetro y de la identificación botánica. Los errores de medición en diámetro y altura tuvieron poca influencia sobre el cómputo global del error, a excepción del caso en el que las alturas se estimaron en función del diámetro.

Palabras clave

Muestreo, monitorización forestal, REDD+, carbono

1. Introducción

La biomasa es una variable de gran interés en el ámbito forestal, debido en parte a que su determinación es necesaria para la estimación del carbono acumulado en el estrato arbóreo. En el contexto del mercado internacional de emisiones de gases de efecto invernadero, los acuerdos más recientes de la Convención Marco de las Naciones Unidas para el cambio climático (UNFCCC) establecen que los programas de mitigación ligados al ámbito forestal deben estar basados en resultados (ANGELSEN et al 2012). La precisión en la estimación de los stocks de carbono tiene una importancia mayor en este proceso, debido a que afecta directamente al precio de los créditos de emisión y a la credibilidad del proceso de medición, reporte y verificación de las emisiones evitadas. Estos procesos de estimación están basados en principios de muestreo estadístico, ya que permiten la determinación del error cometido en la estimación. Estas técnicas son bien conocidas en el ámbito forestal debido a que son la base metodológica del Inventario Forestal.

Es una práctica común en el ámbito del Inventario Forestal el calcular el error de la estimación de una variable poblacional desconocida considerando los errores de muestreo como única fuente de incertidumbre. Para las técnicas de muestreo basadas en diseño, este error se computa exclusivamente en base a la variabilidad en los valores que toma la variable de interés en los elementos que conforman la muestra. Sin embargo, el error de muestreo es únicamente una parte del total de fuentes de error que interactúan en el proceso de estimación de una variable poblacional desconocida. De esta forma, es bastante optimista considerar que la determinación del valor de la variable objetivo para una unidad muestral determinada es una estimación libre de incertidumbre. Esta incertidumbre es característica del proceso de estimación, el cual está formado tanto por el método usado como por los errores cometidos por los equipos de medición en el proceso de toma de

datos. Estos errores son denominados errores no muestrales (PRODAN et al 1997), y afectan al error de muestreo aportando variabilidad residual y reduciendo la eficiencia de la estimación.

La determinación de la biomasa por parcela en base a las mediciones de árbol individual es un proceso en el que intervienen distintas tipologías de errores y escalas de estimación. Mientras que una serie de variables son directamente medidas, viéndose afectada la determinación de los valores de estas únicamente por errores de medición, otras son estimadas mediante modelos y por lo tanto su error es de determinación más compleja (CUNIA 1979). En cuanto a la escala de estimación, los valores de las mediciones o estimaciones de las variables de árbol individual son agregados a nivel de parcela en base a diseños de parcela que tienen error en su implementación. En el proceso de agregación, ocurren compensaciones de los errores de carácter aleatorio, lo que atenúa el efecto de los errores de medición de algunas variables sobre la estimación final.

La estimación de la biomasa por parcela es, por lo tanto, el resultado de operaciones entre variables cuyos valores tienen asociados distintos niveles y estructuras de error. El cómputo del error total en el proceso de estimación requiere la aplicación de técnicas de propagación de errores, las cuales permiten determinar tanto la estructura de errores como la forma de propagación de cada fuente de error individual sobre la estimación total. La estructura de errores (*error budget*) se refiere a la cuantificación de la contribución de cada una de las distintas fuentes de error al total de errores no muestrales para las condiciones concretas del proceso de estimación (GERTNER 1990). A modo de comparación, la magnitud de estos errores suele reportarse en relación a los errores muestrales, ya que la cuantificación de estos últimos es de uso más generalizado.

El proceso de optimización de un ejercicio de muestreo consiste en minimizar los errores no muestrales, maximizando de esta forma la eficiencia muestral (PRODAN et al 1997). Este proceso de optimización requiere del estudio detallado de la estructura de errores para el proceso de estimación de la variable de interés, y cobra mayor importancia en aquellas situaciones en las que se espera que la eficiencia del muestreo sea reducida. Para el caso concreto del Inventario Forestal, estas situaciones suelen darse en muestreos de masas naturales con distintos estados de desarrollo y de degradación, especialmente en zonas donde la recogida de la información es muy costosa. Este es el caso de la mayoría de países elegibles para la implementación de proyectos REDD+, donde cualquier posibilidad de mejora de los niveles de incertidumbre y en la eficiencia de la estimación del error de muestreo redundaría en una mayor credibilidad de los resultados y precio de los créditos de emisión de carbono.

2. Objetivos

El objetivo del presente trabajo es la caracterización de la importancia de las distintas fuentes de error en la estimación de biomasa en inventarios forestales sobre bosques naturales con una elevada diversidad específica. Las fuentes de error consideradas en el presente trabajo fueron: los errores de medición en diámetro normal, en altura total, en posición del árbol y en identificación botánica y los errores de los modelos de árbol individual de relación altura-diámetro y de biomasa. Como caso de estudio, se presentan los resultados para un inventario forestal establecido en bosque tropical lluvioso inundable sobre turberas en la isla de Borneo, Indonesia.

3. Metodología

Área de estudio

El área de estudio del presente trabajo se localiza en el Parque Nacional de Sebangau, Central Kalimantan, Borneo (Indonesia). En el año 2013 se estableció un inventario forestal con el objetivo de caracterizar los stocks de biomasa aérea en el Parque Natural Sebangau. Los diseños muestral y observacional fueron optimizados en base a un estudio previo en la zona (ENGLHART et al 2011). El diseño muestral consistió en un muestreo sistemático con una malla cuadrada de lado 2.5 km, estableciéndose un total de 46 parcelas. Debido a las complicadas condiciones de accesibilidad, el área de estudio se redujo a aquellas áreas que pudieron ser alcanzadas en expediciones de muestreo a pie de una semana. El diseño observacional consistió en parcelas circulares anidadas concéntricas

en la que los umbrales de los distintos tamaños de árbol para ser medidos en cada una de las parcelas y los tamaños de las mismas fueron: árboles de entre 5 y 17 cm de diámetro normal (d) en una subparcela de 4 m de radio, $17 \geq d > 30$ cm en una subparcela de 8 m de radio y $d \geq 30$ cm en una subparcela de 16 m de radio. El diseño observacional fue optimizado de forma que cada subparcela anidada contribuyese en la misma proporción sobre el total del área basimétrica.

En cada uno de los árboles seleccionados se midió el diámetro normal (d , cm) mediante cinta diamétrica con precisión milimétrica, la posición con respecto al centro de la parcela en coordenadas polares mediante brújula y distanciómetro Vertex IV, y se determinó la especie mediante identificación del nombre local. En una muestra de 10 árboles por parcela se midió la altura total (h , m) mediante hipsómetro Vertex IV con precisión decimétrica. Los árboles seleccionados en cada parcela fueron los 6 más gruesos y los 4 árboles más próximos al centro de la parcela.

Adicionalmente a las parcelas descritas anteriormente, se estableció una parcela de censo completo de 120 x 120 m en la que se midió el diámetro normal, la altura total y la posición de todos los árboles con un $d > 5$ cm. Los árboles fueron identificados a nivel de especie por un botánico con experiencia en esta tipología de bosques, así como su nombre local por miembros de los equipos de medición. La distribución de los errores de medición de diámetros, alturas y posiciones se caracterizaron mediante la remediación de todos los árboles en varias ocasiones y por distintos equipos de medición. Estas mediciones se efectuaron en un intervalo de tiempo suficientemente corto con respecto a la primera medición para evitar crecimiento en las variables de árbol individual. Paralelamente a las remediciones se identificó el nombre local de todos los árboles en varias ocasiones y por distintos equipos de medición, lo cual tuvo por objetivo la caracterización del error de identificación botánica en inventarios de escala amplia.

La biomasa de árbol individual se estimó mediante las ecuaciones de biomasa desarrolladas por MANURI et al (2014) para bosques tropicales lluviosos sobre turberas en Indonesia. Estas ecuaciones tienen como variables independientes d , h y la densidad básica (db). Los valores de db fueron asignados a árboles individuales en base a su identificación botánica y a bases de datos globales de esta variable para especies tropicales. La asignación de valores de db para cada uno de los individuos se realizó según la metodología de FLORES & COOMES (2011), de forma que para aquellas especies para las que se dispuso de más de un valor de db en las bases de datos se asignó el valor medio aritmético de todos los valores de db disponibles a todos los individuos de esa especie. Para aquellas especies o géneros para los que no se dispuso de un valor de db específico, se les asignaron valores de db medios calculados a niveles taxonómicos superiores. Los valores de biomasa por árbol individual fueron agregados por subparcela, y estos expandidos a valores por hectárea mediante los factores de expansión característicos de cada diseño anidado.

Propagación de errores. La cuantificación de la contribución de las distintas fuentes de incertidumbre sobre el total para la estimación de biomasa por parcela se computó para cada variable o factor mediante técnicas Monte Carlo según se describe en YANAI et al (2010). Para cada variable o factor considerado se generaron 10.000 realizaciones aleatorias de su valor siguiendo el patrón de incertidumbre observado, manteniendo fijos los valores característicos para el resto de factores. Cada realización aleatoria fue empleada para el cálculo de la biomasa por hectárea, y el error total fue expresado en términos medios cuadráticos mediante el cómputo de la diferencia al cuadrado entre el valor de biomasa por hectárea calculada para cada iteración con respecto al valor medio característico sin considerar incertidumbre. A continuación, se describe el proceso seguido para la cuantificación del patrón de incertidumbre para cada variable o factor considerado.

Errores de medición de diámetro normal, altura total y posición. Para las variables d , h y p únicamente se consideró el error de medición como fuente de incertidumbre. El error de medición para estas variables fue caracterizado mediante un modelo aditivo, usando como información de base la recogida en la parcela de censo completo en la que los mismos árboles fueron remedidos en varias ocasiones.

Errores de determinación de densidad básica. Para la variable db se consideraron como fuentes de error la identificación botánica y la variabilidad en los valores publicados de db para cada especie o grupo taxonómico. Los errores de identificación botánica se cuantificaron en la parcela de censo completo, donde se usó la identificación de los individuos realizada por el botánico

experimentado como el valor libre de incertidumbre y la identificación realizada por los equipos de medición como la estimación con incertidumbre. El efecto de la variabilidad en los valores de db publicados se evaluó mediante la cuantificación de la variabilidad en los valores publicados de densidad básica para los distintos niveles taxonómicos (especie, género y familia).

Error de los modelos de biomasa y de relación altura-diámetro. Las fuentes de incertidumbre consideradas para los modelos de biomasa y de relación altura-diámetro fueron el error de estimación de los parámetros y el error residual (CUNIA 1979). El error en la estimación de los parámetros se cuantificó mediante la generación aleatoria de colecciones de parámetros en base a la matriz de varianzas-covarianzas resultante del ajuste de los modelos. La contribución del error residual de los modelos al error total se cuantificó mediante la modelización de la estructura del error residual de los modelos y la generación aleatoria de realizaciones del valor de la variable dependiente para cada elemento de la muestra. No se consideró el error debido a la elección del modelo.

Se consideraron tres escenarios para el caso de la medición o estimación de las alturas para aquellos árboles en los que esta variable no fue medida. En el primer escenario considerado se supone que todas las alturas fueron medidas. Debido a que el protocolo de campo no contempló esta posibilidad, las alturas de los árboles que no fueron medidas en campo se estimaron mediante modelos altura-diámetro ajustados para cada especie o grupos de especies. La variabilidad residual fue reconstruida en base a la estructura del error observada en los modelos altura-diámetro anteriormente citados. En este escenario, la única fuente de incertidumbre para la determinación de las alturas de árboles individuales es el error de medición. El segundo escenario considera que, tal y como se describe en el apartado correspondiente, únicamente 10 árboles son medidos en altura en cada parcela, y que la altura del resto de los árboles es estimada en base a un modelo altura-diámetro ajustado para todas las parcelas conjuntamente. El tercer escenario considera que únicamente se mide la altura en 10 árboles por parcela y que las alturas del resto de árboles se estiman en base a relaciones altura-diámetro ajustadas para cada parcela. Para estos dos últimos escenarios las fuentes de incertidumbre son los errores de medición en los árboles que sirven para ajustar los modelos altura-diámetro, y los errores del modelo altura-diámetro.

Error de muestreo. Para hacer comparables los resultados obtenidos para los errores no muestrales con los muestrales, el error de muestreo se computó como la varianza de los elementos que conforman la muestra (PICARD et al 2014).

4. Resultados

La Tabla 1 muestra la caracterización de los errores de medición en diámetro normal (d), altura total (h) y posición (p) para las condiciones de toma de datos descritas anteriormente. En las Figuras 1-3 se muestran los resultados de la estructura de errores para los tres escenarios considerados. El primer escenario es el caso en el que se miden las alturas de todos los árboles que son seleccionados en la parcela (Figura 1). El segundo escenario es el caso en el que únicamente se miden las alturas de 10 árboles por parcela, elegidos de la forma que se describe en la sección de Material y Métodos, y se ajusta un modelo altura-diámetro único para todo el inventario para la estimación de las alturas en aquellos pies para los que no se dispuso de medición (Figura 2). El tercer escenario es similar al segundo escenario, pero se ajusta un modelo altura-diámetro para cada parcela (Figura 3).

Tabla 1. Caracterización de los errores de medición en diámetro normal (d), altura total (h) y posición (p)

Parámetro	Des.Est.	ϵ_{MAX}	Unidades
d	0.602	10.35	cm
h	1.161	6.15	m
p	0.233	3.095	m

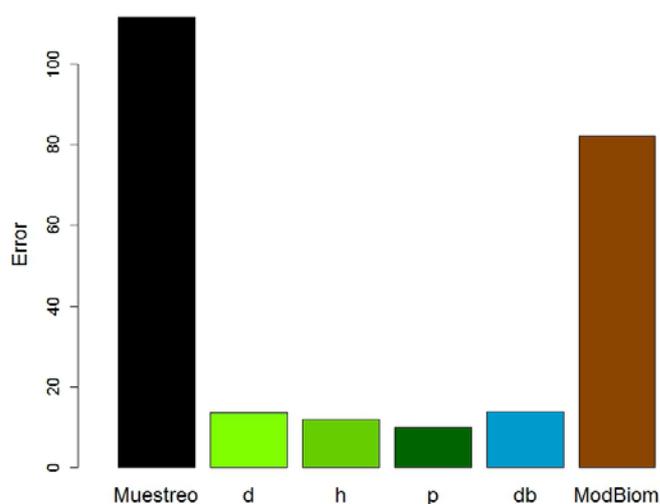


Figura1. Estructura de errores en la estimación de la biomasa por hectárea para el caso en que se miden todas las alturas de los árboles. Muestreo: error de muestreo; d: diámetro normal; h: altura total; p: posición; db: identificación botánica y su efecto sobre la densidad básica; ModBiom: modelo de estimación de biomasa.

Para el caso del escenario 1 (Figura 1) se comprueba que, dentro de los errores no muestrales, la mayor fuente de incertidumbre es el modelo empleado para la estimación de biomasa de árbol individual. Únicamente este factor supone un 62.3% del total de los errores no muestrales. El resto de factores considerados para este escenario tuvieron una importancia similar sobre el total de errores no muestrales. De esta forma, las variables *db*, *d*, *h* y *p* supusieron un 10.6%, 10.4%, 9.2% y 7.5%, respectivamente sobre el total del error no muestral.

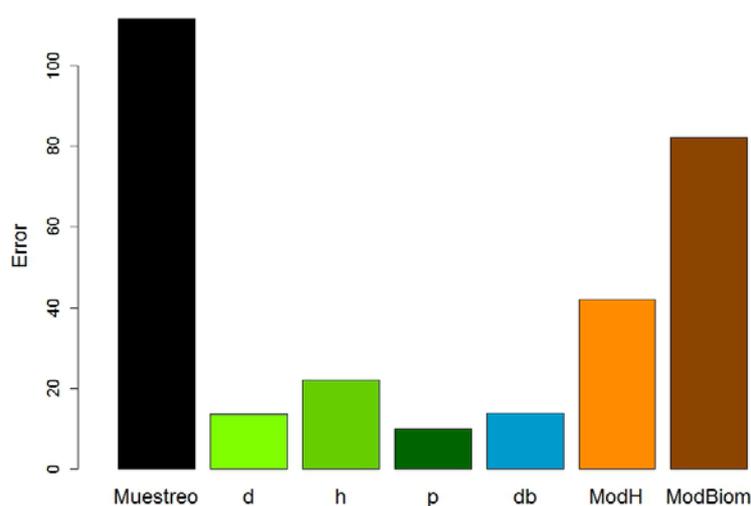


Figura2. Estructura de errores en la estimación de la biomasa por hectárea para el caso en que se mide la altura únicamente en una muestra de 10 árboles por parcela y el resto de alturas son estimadas en base a un modelo altura-diámetro ajustado con los datos de todas las parcelas. Muestreo: error de muestreo; d: diámetro normal; h: altura total; p: posición; db: identificación botánica y su efecto sobre la densidad básica; ModH: modelo altura-diámetro; ModBiom: modelo de estimación de biomasa.

La Figura 2 muestra el resultado para el escenario dos, en el cual se usó un modelo altura diámetro común para todas las parcelas. En este escenario se añade el modelo altura-diámetro como una nueva fuente de incertidumbre, con una importancia sobre el total de los errores no muestrales del 22.9%. El modelo de biomasa continúa siendo la mayor fuente de incertidumbre con un 44.7% del total de los errores no muestrales. La contribución del error de medición en las alturas aumenta en este escenario tanto en términos absolutos como en términos relativos, con una contribución del 12.0% sobre el total de errores no muestrales. Las variables db , d y p supusieron un 7.6%, 7.4% y 5.4% respectivamente del total de errores no muestrales.

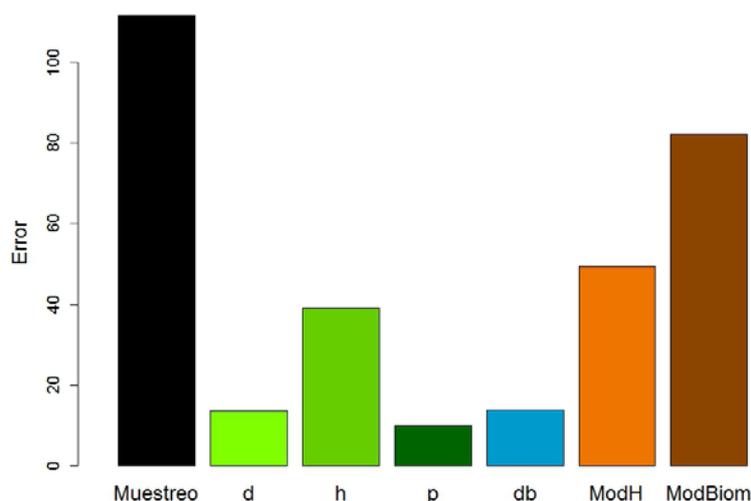


Figura3. Estructura de errores en la estimación de la biomasa por hectárea para el caso en que se mide la altura únicamente en una muestra de 10 árboles por parcela y el resto de alturas son estimadas en base a un modelo altura-diámetro ajustado para cada parcela. Muestreo: error de muestreo; d: diámetro normal; h: altura total; p: posición; db: identificación botánica y su efecto sobre la densidad básica; ModH: modelo altura-diámetro; ModBiom: modelo de estimación de biomasa.

La Figura 3 muestra el resultado de la estructura de errores para el tercer escenario, en el cual se usó un modelo altura diámetro distinto para cada parcela de inventario. En este escenario el modelo altura-diámetro tiene una mayor importancia en términos absolutos y relativos que en el escenario dos, con una contribución del 23.8% sobre el total de errores no muestrales. La contribución del error de medición de h toma un valor máximo en este escenario, tanto en términos absolutos como relativos (18.8% sobre el total de errores no muestrales). El modelo de biomasa contribuye en un 39.4% al total de los errores no muestrales. Las variables db , d y p supusieron un 6.7%, 6.6% y 4.7% respectivamente del total de errores no muestrales.

La Figura 4 muestra la suma de los errores no muestrales con respecto al error de muestreo para cada uno de los escenarios considerados. Los errores no muestrales son superiores al error de muestreo en todos los casos, con unos valores de 1.2, 1.6 y 1.9 veces el error muestral para los escenarios uno, dos y tres, respectivamente.

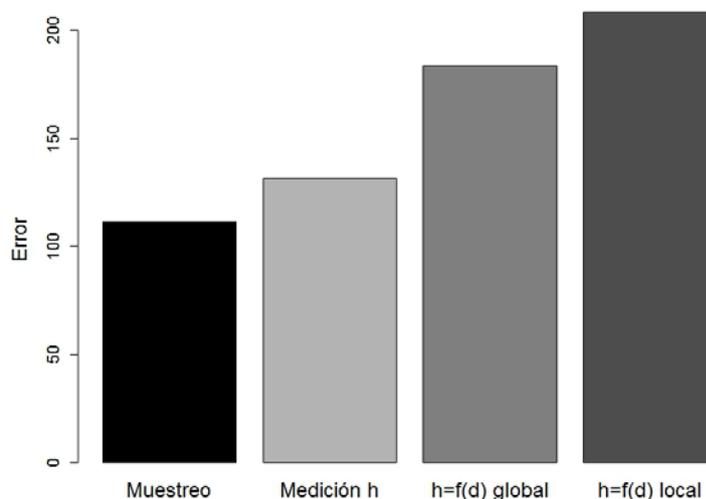


Figura4. Comparación de los errores muestrales (“Muestreo”) con respecto a la suma de los errores no muestrales para las tres alternativas consideradas: medición de la altura en todos los árboles (“Medición h”), medición de la altura en una muestra de 10 árboles por parcela y ajuste de un único modelo altura-diámetro para todo el inventario (“h=f(d) global”) y el mismo caso pero con el ajuste de un modelo altura-diámetro para cada parcela (“h=f(d) local”).

5. Discusión

En la práctica del Inventario Forestal no es habitual la caracterización de la estructura de los errores no muestrales. Sin embargo, una adecuada cuantificación de este tipo de errores aporta credibilidad y robustez a la estimación del error de muestreo en base a la colección de parcelas que conforman la muestra. Ello es a pesar de que la contribución de los errores no muestrales sobre el error total puede ser reducida cuando ambos son expresados en términos de error de muestreo (HOLDAWAY et al 2014). Un estudio detallado de la estructura de errores en inventarios a gran escala permite la optimización de la recogida de la información y un mejor control de calidad en las sucesivas adquisiciones de datos. Países como Estados Unidos (MCROBERTS & WESTFALL 2014), Noruega (BREIDENBACH et al 2014) y Austria (BERGER et al 2014) ya han realizado este tipo de estudios para sus respectivos Inventarios Forestales Nacionales.

En este estudio se ha observado que los errores de medición tienen una importancia relativamente pequeña en la estimación de biomasa por hectárea en comparación con los errores de muestreo para todos los escenarios considerados, como ya habían observado otros autores (GERTNER 1990, PHILLIPS et al 2000, WESTFALL AND PATTERSON 2007). Ello ha sido debido probablemente al control efectivo de la calidad de la toma de mediciones, y al proceso de entrenamiento previo de los equipos de medición. Los errores de medición en altura tuvieron una importancia distinta para los tres escenarios considerados. La contribución del error de medición en altura fue mayor en ambos escenarios donde la altura fue estimada en base a relaciones altura diámetro, siendo máxima para el caso en el que la altura fue estimada en base a relaciones altura-diámetro específicas para cada parcela. Estos resultados sugieren que esta práctica debe ser evitada cuando interesa minimizar los errores no muestrales.

La mayor fuente de incertidumbre en todos los escenarios considerados fueron los errores asociados al modelo de estimación de biomasa de árbol individual. Esto ya ha sido observado por otros autores en procesos de estimación de biomasa y volumen por parcela (GERTNER 1990, CHAVE et al 2004, MOLTO et al 2013), y se ha descrito que reducciones moderadas en la incertidumbre de este factor pueden causar grandes reducciones en el total de errores no muestrales (GERTNER 1990). Se ha observado además que la elección del modelo alométrico tiene una importancia mayor

que los errores debidos al modelo en la estimación de biomasa en bosques tropicales (CHAVE et al 2004, PICARD et al 2014). Esto es debido al sesgo que comenten los distintos modelos candidatos sobre el modelo poblacional desconocido en el que solo se considera el error en la estimación de los parámetros en base a la muestra y el error residual. El efecto de la elección del modelo de biomasa no ha sido considerado en el presente trabajo, asumiendo de esta forma que el modelo produce, de media, estimaciones insesgadas de la biomasa del árbol individual.

Estudios previos han concluido que la contribución de los procesos de estimación de densidad básica o de altura de árboles individuales en base a modelos altura-diámetro es reducida (MOLTO et al 2013). Sin embargo, en este trabajo se observa una elevada importancia de los modelos altura-diámetro en el total de errores no muestrales. Esta contribución tan elevada de los errores puede ser debida a los reducidos tamaños de muestra que se emplearon en el ajuste de los modelos altura-diámetro para todos los escenarios considerados. A este respecto se ha de considerar la relación inversa existente entre el tamaño de muestra considerado para el desarrollo de los modelos y el error de sus estimaciones, habiéndose establecido un límite de 100 individuos como muestra para la producción de resultados fiables en inventarios forestales de volumen a gran escala (MCROBERTS & WESTFALL 2014). El error de asignación de densidad básica a cada árbol individual no ha sido considerado adecuadamente en la mayoría de los estudios previos, ya que consideran el proceso de asignación puramente determinístico únicamente sometido a la incertidumbre de asignación de densidad básica para aquellas especies no presentes en las bases de datos globales (MOLTO et al 2013). HOLDAWAY et al (2014) hacen un estudio riguroso sobre este aspecto, pero concluyen que no tiene una importancia elevada, probablemente debido a que su estudio se realizó en bosques templados con baja diversidad específica. En nuestro trabajo, se comprueba que es uno de los factores que más contribuyen a la incertidumbre total, pero se ha de tener en cuenta que la contribución de este factor al total de incertidumbre depende de la calidad de la identificación botánica y de las diferencias en densidad básica entre especies. De esta forma, para calidades de identificación de especies bajas y elevada variabilidad en los valores de densidad básica entre especies, la contribución de este aspecto puede ser mucho mayor a la descrita en el presente trabajo.

Se ha observado que el total de errores no muestrales supera a los errores muestrales para todos los escenarios considerados. Existen trabajos que han observado lo contrario para estimaciones de volumen a gran escala (PHILLIPS et al 2000). Los resultados obtenidos por estos autores pueden atribuirse a la no consideración de factores de incertidumbre que han sido considerados en el presente trabajo, como la posición de los árboles o la incertidumbre en la determinación de la densidad básica de cada árbol, así como al elevado tamaño de muestra. En todo caso, cabe recordar que los resultados de PHILLIPS et al (2000) no son directamente comparables con los aquí obtenidos, ya que el error se expresó en términos de error estándar en lugar del error medio cuadrático, como se ha hecho en el presente trabajo.

En el presente trabajo únicamente se han considerado errores aleatorios. En el caso de que alguna de las variables sea determinada con sesgo, los errores no muestrales se verían incrementados en una cantidad dependiente de la intensidad del sesgo, lo que para las condiciones habituales de medición de volumen por parcela puede suponer varias veces la suma del total de errores muestrales y no muestrales sin errores sistemáticos (GERTNER 1990, WESTFALL & PATTERSON, 2007). Debido a que los errores de los modelos son los que más afectan al total de errores no muestrales, para aquellos modelos que no han sido desarrollados localmente es recomendable la justificación de que producen de estimaciones insesgadas. Una alternativa a este respecto es la metodología descrita en PÉREZ-CRUZADO et al (2015), la cual permite juzgar cuando un modelo produce estimaciones sesgadas, así como corregirlas mediante la localización del mismo.

6. Conclusiones

En el presente trabajo se cuantifican la contribución de distintas fuentes de incertidumbre sobre los errores no muestrales en inventarios forestales de biomasa en bosques naturales. El total de los errores no muestrales, así como la importancia de cada factor individual sobre el total de los mismos, depende y es característico del proceso de estimación. Este proceso de estimación lo

conforman: el método de estimación usado para determinar la variable de interés en base a las mediciones de campo y la precisión con la que estas variables son medidas. Se observa que los errores debidos a los modelos son la mayor fuente de incertidumbre, seguidas de los errores en la determinación de la densidad básica en base a la identificación botánica y a los errores de posicionamiento y de medición de los árboles individuales. Los errores de medición en alturas son reducidos cuando se mide la altura en todos los pies, pero aumentan considerablemente cuando algunas de las alturas son estimadas en base a modelos altura-diámetro. Los errores no muestrales son máximos cuando estos modelos son ajustados a nivel de parcela.

7. Agradecimientos

Las investigaciones del presente trabajo han sido financiadas mediante los proyectos de investigación: “*Development an integrated forest carbon monitoring system with field sampling and remote sensing*” (Proyecto KL895/17, Agencia Alemana de Investigación- DFG), “*Ecological and Socioeconomic Functions of Tropical Lowland Rainforest Transformation Systems in Sumatra, Indonesia*”, “*Methodological approaches to the assessment of all tree resources in transition systems in forested tropical landscapes*” (Proyecto CRC990 EFForTS-B05, Agencia Alemana de Investigación – DFG), y “*Estimation of forest biomass and tree species diversity in forested tropical landscapes in Indonesia combining RapidEye imagery, LiDAR and field inventories*” (Proyecto RESA-DLR-643, Agencia Aeroespacial Alemana - RESA). El primer autor ha sido financiado mediante un contrato Juan de la Cierva – Incorporación del Ministerio de Economía y Competitividad (IJCI-2014-20614) y con un contrato Marie Skłodowska-Curie Actions European Fellowship (Project QUAFORD) de la Comisión Europea.

8. Bibliografía

ANGELSEN, A.; BROCKHAUS, M.; SUNDERLIN, W.D.; VERCHOT, L.V.; 2012. Analysing REDD+: Challenges and Choices. Cifor, 426pp, Bogor, Indonesia.

BERGER, A.; GSCHWANTNER, T.; MCROBERTS, R.E.; SCHADAUER, K.; 2014. Effects of Measurement Errors on Individual Tree Stem Volume Estimates for the Austrian National Forest Inventory. *For. Sci.* 60, 14-24.

BREIDENBACH, J.; ANTÓN-FERNÁNDEZ, C.; PETERSSON, H.; MCROBERTS, R.E.; ASTRUP, R.; 2014. Quantifying the model-related variability of biomass stock and change estimates in the Norwegian National Forest Inventory. *For. Sci.* 60, 25-33.

CHAVE, J.; CONDIT, R.; AGUILAR, S.; HERNANDEZ, A.; LAO, S.; PEREZ, R.; 2004. Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates. *Philos. T. Roy. Soc. B* 359, 409-420.

CUNIA, T.; 1979. On sampling trees for biomass tables construction: Some statistical comments. En: Frayer, W.E., (Ed.). Forest resource inventories, Vol. 2. Colorado State University, Fort Collins, Colorado, pp. 643-664.

ENGLHART, S.; KEUCK, V.; SIEGERT, F.; 2011. Aboveground biomass retrieval in tropical forests—The potential of combined X-and L-band SAR data use. *Remote Sens. Environ.* 115, 1260-1271.

FLORES, O.; COOMES, D.A.; 2011. Estimating the wood density of species for carbon stock assessments. *Methods Ecol. Evol.* 2, 214-220.

GERTNER, G.Z.; 1990. The sensitivity of measurement error in stand volume estimation. *Can J For Res* 20, 800-804.

HOLDAWAY, R.J.; MCNEILL, S.J.; MASON, N.W.H.; CARSWELL, F.E.; 2014. Propagating uncertainty in plot-based estimates of forest carbon stock and carbon stock change. *Ecosystems* 17, 627-640.

MANURI, S.; BRACK, C.; NUGROHO, N.P.; HERGOUALC'H, K.; NOVITA, N.; DOTZAUER, H.; VERCHOT, L.; PUTRA, C.A.S.; WIDYASARI, E.; 2014. Tree biomass equations for tropical peat swamp forest ecosystems in Indonesia. *For. Ecol. Manage.* 334, 241-253.

MCROBERTS, R.E.; WESTFALL, J.A.; 2014. Effects of Uncertainty in Model Predictions of Individual Tree Volume on Large Area Volume Estimates. *For. Sci.* 60, 34-42.

MOLTO, Q.; ROSSI, V.; BLANC, L.; 2013. Error propagation in biomass estimation in tropical forests. *Method. Ecol. Evol.* 4, 175-183.

PÉREZ-CRUZADO, C.; FEHRMANN, L.; MAGDON, P.; CAÑELLAS, I.; SIXTO, H.; KLEINN, C.; 2015. On the site-level suitability of biomass models. *Environmental Modelling & Software* 73, 14-26.

PHILLIPS, D.L.; BROWN, S.L.; SCHROEDER, P.E.; BIRDSEY, R.A.; 2000. Toward error analysis of large-scale forest carbon budgets. *Global Ecol. Biogeogr.* 9, 305-313.

PICARD, N.; BOSELA, F.B.; ROSSI, V.; 2014. Reducing the error in biomass estimates strongly depends on model selection. *Ann. For. Sci.* 1-13.

PRODAN, M.; PETERS, R.; COX, F.; REAL, P.; 1997. Mensura Forestal. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, San José (Costa Rica).

WESTFALL, J.A.; PATTERSON, P.L.; 2007. Measurement variability error for estimates of volume change. *Can J For Res* 37, 2201-2210.

YANAI, R.D.; BATTLES, J.J.; RICHARDSON, A.D.; BLODGETT, C.A.; WOOD, D.M.; RASTETTER, E.B.; 2010. Estimating uncertainty in ecosystem budget calculations. *Ecosystems* 13, 239-248.