



6º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

6CFE01-023

Montes: Servicios y desarrollo rural
10-14 junio 2013
Vitoria-Gasteiz



Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Vitoria-Gasteiz, 10-14 junio de 2013
ISBN: 978-84-937964-9-5
© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Modelos para estimar la biomasa de especies forestales en sistemas agroforestales de la ecorregión andina del Ecuador.

RIOFRÍO, J.¹. HERRERO DE AZA, C.¹., GRIJALVA, J.². BRAVO, F.¹.

¹ Instituto Universitario de Investigación en Gestión Forestal Sostenible Universidad de Valladolid-INIA. Avda. Madrid 44, 34071, Palencia, España

² Programa Nacional de Forestería, Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias, Panamericana sur km1, Quito, Ecuador

Resumen

Los sistemas agroforestales en la ecorregión andina del Ecuador son sistemas de aprovechamiento de gran relevancia socioeconómica y biofísica por la diversificación de productos y servicios que prestan. La estimación de biomasa en estos sistemas se considera una prioridad, para valorar su potencial como sumideros de carbono y su funcionalidad en términos de producción de biomasa. En este trabajo se ajustaron un conjunto de ecuaciones que permiten estimar de una manera fácil y confiable la biomasa aérea total de cuatro especies forestales, *Acacia melanoxylon*, *Alnus acuminata*, *Buddleja coriacea* y *Polylepis racemosa*. Los mejores modelos para las distintas fracciones (fuste, ramas gruesas, ramas delgadas y hojas) de cada especie se ajustaron de forma simultánea según la metodología SUR (*seemingly unrelated regressions*). Todos los modelos mostraron un ajuste elevado (en términos de coeficiente de determinación). La inclusión de la altura y diámetro como variables explicativas en los modelos mejoró su capacidad de predicción y amplía su rango de aplicación, ya que puede expresar la variabilidad en las estimaciones de biomasa en función de las condiciones de competencia, características del rodal y sitio.

Palabras clave

Ajuste simultáneo, estimación de biomasa, modelos alométricos, ecorregión andina, sistemas agroforestales.

1. Introducción

En la ecorregión Andina del Ecuador, la agroforestería es un sistema de aprovechamiento frecuentemente utilizado, como medida para la diversificación de productos y servicios, optimización de recursos, disminución de riegos, generación de ingresos económicos y para garantizar la seguridad alimentaria, por eso, constituye una alternativa que compatibiliza la producción y conservación. En este sentido, es necesario ampliar el conocimiento sobre las interacciones entre los componentes del sistema, en términos estructurales y funcionales. Para ello, la evaluación de la sostenibilidad a través de indicadores que cuantifiquen la medida del efecto positivo o negativo de las alternativas (ARÉVALO VIZCAINO, 2009; TORQUEBLAU, 1992), es una metodología que se ha implementado exitosamente en la región. En ese contexto, el desarrollo y aplicación de métodos eficientes para la estimación de biomasa y carbono en ecosistemas forestales se considera una prioridad, para valorar su potencial como sumidero de carbono y su funcionalidad en términos de producción de biomasa.

La cuantificación de carbono en un sistema forestal o para una especie específica, se realiza a través de la estimación de biomasa, conociendo la cantidad total de materia orgánica viva del sistema o individuo, expresada como toneladas o megagramos (Mg) de peso seco por unidad de superficie. Dicha estimación se puede realizar por métodos destructivos, sin embargo, estos consumen mucho tiempo y recursos especialmente en la medición de ciertas fracciones como hojas o ramas, por tanto se justifica el desarrollo de ecuaciones alométricas que relacionen la biomasa seca con variables dendrométricas comunes y de fácil medición, como el diámetro a la altura del pecho y la altura total. Estas relaciones se basan en el principio de alometría, que relaciona las mediciones de crecimiento o tamaño de una parte con las dimensiones del organismo completo (PARRESOL, 1999).

Previamente se han desarrollado algunas ecuaciones alométricas para especies distribuidas por la región andina (CALDERÓN y LOZADA, 2010; FEHSE et al., 2002; RIOFRÍO, 2007), sin embargo las ecuaciones para cada componente y especie normalmente han sido ajustadas por separado sin considerar la correlación inherente entre las fracciones medidas y la biomasa total del árbol. En consecuencia las estimaciones de los modelos generados no son los de mayor eficiencia y no presentan una relación aditiva entre las ecuaciones de las fracciones (ÁLVAREZ-GONZÁLEZ et al., 2007). Esto significa que los valores pronosticados por las ecuaciones de biomasa de los componentes no concuerdan con el valor predicho por la ecuación para la biomasa total del árbol (BI et al., 2004; PARRESOL, 2001).

2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es ajustar un conjunto de ecuaciones que permitan estimar de una manera fácil y confiable la biomasa de cuatro especies forestales, dos arbóreas (*Acacia melanoxylon* y *Alnus acuminata*) y dos de matorral (*Polylepis racemosa* y *Buddleja coriacea*), usadas frecuentemente en sistemas agroforestales de la ecorregión andina del Ecuador.

3. Metodología

Área de estudio

Este estudio comprende dos sistemas agroforestales de evaluación permanente establecidos como unidades experimentales y demostrativas del Programa Nacional de Forestería del Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), ubicados en la ecorregión andina del Ecuador sobre la estribación interior norte y centro de la cordillera occidental, sobre los 3000 m.s.n.m (Figura 1), y que se encuentran dentro del tipo de vegetación definido como Bosque Siempreverde Montano Alto (BAQUERO et al., 2004), donde predomina un clima ecuatorial de alta montaña, caracterizado por una precipitación anual entre 1000 – 2000 mm, con una estación seca establecida y una temperatura media que varía alrededor de 10° C.

En mayor proporción, los sistemas agroforestales de esta región están presentes en fincas de pequeños productores con superficies menores a 3 hectáreas, donde el componente forestal presenta distinta composición y estructura de acuerdo a las condiciones bioclimáticas y objetivo de producción, y el componente agrícola se caracteriza por su producción

básicamente de subsistencia basada en la aplicación de sistemas de rotaciones de cultivos anuales y pastura para la crianza de ganado (CHECA et al., 2010).

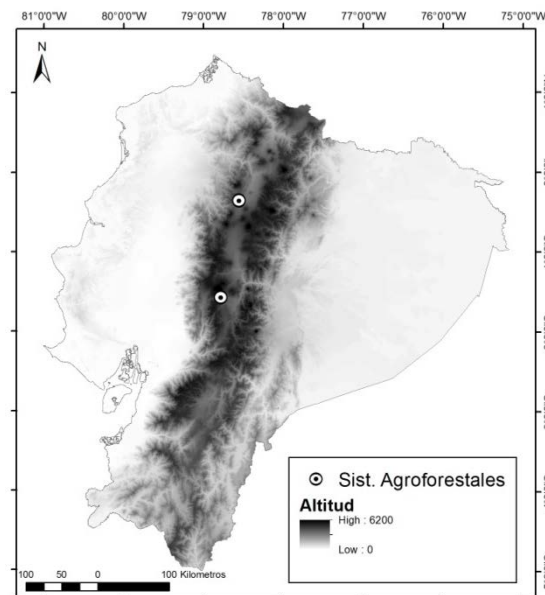


Figura 1. Ubicación de sistemas agroforestales evaluados en la región andina del Ecuador.

Datos

Los datos de biomasa corresponden a dos especies arbóreas *Acacia* (*Acacia melanoxylo*) y *Aliso* (*Alnus acuminata*), y dos especies arbustivas *Yagual* (*Polylepis racemosa*) y *Colle* (*Buddleja coriacea*), generalmente usadas dentro de diferentes sistemas agroforestales en la ecorregión andina. Los individuos muestreados fueron seleccionados considerando las diferentes clases diamétricas en cada sistema. Se evaluaron 30 individuos para *Acacia* y *Aliso*, 18 para *Yagual* y 13 para *Colle* (Tabla 1), en todos los casos se empleó el método destructivo, separando y pesando las fracciones de cada especie, tomando muestras representativas para determinar el porcentaje de humedad (75°C hasta llegar a peso constante), y obteniendo la biomasa aérea seca total y por componente. Para las especies arbóreas se consideraron las fracciones fuste con corteza (W_f , diámetro > 7cm), ramas gruesas (W_{rg} , diámetro de 2 - 7cm), ramas delgadas (W_{rd} , diámetro < 2cm) y hojas (W_h). Además se midió la altura total (Ht) y diámetro a la altura normal (DBH) de cada individuo. *Yagual* y *Colle*, son arbustos que presentan ramificaciones desde la base formadas de 3 a 7 ramas por individuo, en este caso sólo se seleccionó una rama por individuo para el muestreo destructivo, considerándose a cada muestra como un individuo diferente. Las muestras se dividieron en tres fracciones ramas gruesas (>2cm), ramas delgadas (<2cm) y hojas, también se midió la altura total (Ht) y diámetro a 30cm del suelo (d) de cada rama muestreada.

Se realizó un análisis gráfico para evaluar las relaciones entre las variables explicativas (DBH y Ht) frente a las variables dependientes, con el fin de identificar valores atípicos, que pudieran alterar los resultados de la modelización.

Tabla 1. Rangos de valores de las especies estudiadas. n: número de muestras; DBH: diámetro a la altura del pecho; Ht: altura; Wt: biomasa total; *: diámetro a 30cm del suelo; min: mínimo; max: máximo; SD: desviación estándar.

Especie	n	DBH (cm)				Ht (m)				Wt (kg)			
		media	SD	min	max	media	SD	min	max	media	SD	min	max
Acacia	30	22,4	4,4	13,4	31,5	17,9	2,4	11,3	24,3	286,8	137,3	69,9	612,4
Aliso	30	14,5	3,2	9,3	20,3	10,7	1,4	6,8	12,8	71,1	37,8	19,9	152,2
Colle	13	11,1*	2,2	8,6	15,6	4,2	0,6	3,1	5,1	13,8	7,6	2,9	30,4
Yagual	18	9,2*	3,4	5,7	15,9	5,0	1,2	3,9	7,7	13,1	16,2	2,7	51,9

Ecuaciones de biomasa

Para el ajuste de la biomasa total y de cada componente se probaron 13 ecuaciones lineales y no lineales (Tabla 2) generalmente utilizadas en la literatura, en función del diámetro (DBH) y la altura (Ht) para las tres especies. Para la selección de los modelos sólo se consideraron aquellos en que todos los parámetros fueron significativos al menos con un $p < 0,05$, excluyéndose los que no cumplieron esta condición. La priorización de los mejores modelos para cada componente y especie se realizó en función de los mejores parámetros de bondad de ajuste en cada ecuación, en sentido jerárquico se consideró el menor valor del criterio de Akaike (AIC), el menor valor de raíz media del cuadrado del error (RMSE) y el mayor coeficiente de determinación (R^2).

Tabla 2. Modelos generales evaluados para estimar biomasa. W: biomasa (kg); DBH: diámetro (cm); Ht: altura (m); α , β , λ y θ : parámetros del modelo.

Modelo
$W = \alpha + \beta * DBH * Ht$
$W = \alpha + \beta * DBH^2 * Ht$
$W = \alpha + \beta * DBH + \lambda * DBH^2$
$W = \alpha + \beta * DBH + \lambda * DBH^2 + \theta * DBH^2 * Ht * Ht$
$W = \alpha + \beta * DBH + \lambda * Ht * Ht$
$W = \alpha + \beta * DBH^2 + \lambda * DBH^2 * Ht * Ht$
$W = \alpha + \beta * DBH^2 + \lambda * Ht$
$W = \alpha + \beta * DBH^2 + \lambda * Ht + \theta * DBH^2 * Ht$
$W = \alpha + \beta * DBH^2 + \lambda * DBH * Ht$
$W = \alpha + \beta * DBH^2 * Ht + \lambda * DBH * Ht$
$W = \alpha + \beta * DBH^\lambda * Ht^\theta$
$W = \alpha + \beta * DBH^\lambda$
$W = \alpha + \beta * (DBH^2 * Ht)^\lambda$

Con el fin de mejorar la precisión de las estimaciones de biomasa de los modelos desarrollados, el mejor modelo de cada fracción se ajustó simultáneamente con la biomasa total según la metodología SUR (*Seemingly Unrelated Regressions*) o de mínimos cuadrados generalizados conjuntos. Este procedimiento confiere la propiedad aditiva a las ecuaciones generadas. Para evitar heterocedasticidad, muy frecuente en datos de biomasa, se utilizó una regresión ponderada para homogeneizar la varianza de los residuos (LAMBERT et al., 2005; RUIZ-PEINADO et al., 2011). El análisis por regresión ponderada asocia a cada observación un peso igual a la inversa de su varianza (σ^2_i), este factor de ponderación se calcula a través

de una función potencial de una variable independiente $\sigma^2_i=(X_i)^k$ (ÁLAVAREZ-GONZÁLEZ et al., 2007; PARRESOL, 2001).

En el ajuste simultáneo (SUR) se comprobó la convergencia del modelo y que todos los parámetros estimados fueran significativos ($p < 0,05$). El análisis de datos se realizó con el programa R 2.15.1 ([Http://www.r-project.org/](http://www.r-project.org/)), fueron necesarios los paquetes “stats” (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2010) y “systemfit” (HENNINGSEN & HAMANN, 2012).

Para evaluar el poder predictivo global de los sistemas de ecuaciones ajustados de cada especie se calculó el error relativo de la biomasa aérea total estimada (Wt_{pred}) frente a la observada (Wt_{obs}), según la ecuación 1 (ALAVAREZ et al., 2012; CHAVE et al., 2005), donde el sesgo general de los modelos es la media del error relativo (%), y la precisión se determinó con el cálculo de la desviación estándar del error relativo (%).

$$\text{Error} = 100 \cdot (Wt_{pred} - Wt_{obs}) / Wt_{obs} \quad [1]$$

4. Resultados

Las relaciones alométricas de las especies arbóreas difirieron de las arbustivas, principalmente en la correlación entre la biomasa total y las fracciones respecto de la altura, siendo mayores en las especies arbustivas que en las arbóreas. En general, el diámetro fue la variable mejor relacionada con todos los componentes y con la biomasa total, siendo significativa en todas las especies (Tabla 3).

Tabla 3. Coeficientes de correlación simple de Pearson, entre biomasa aérea total y variables explicativas. Wt: Biomasa total (kg); Ht: altura total (m); DBH: diámetro a la altura del pecho (cm), *diámetro a 30cm del suelo (cm).

	Acacia		Aliso		Colle*		Yagual *	
	Wt	p-valor	Wt	p-valor	Wt	p-valor	Wt	p-valor
DBH	0,958	<0,0001	0,968	<0,0001	0,950	<0,0001	0,927	<0,0001
Ht	0,655	0,0114	0,644	0,0001	0,820	<0,0001	0,958	<0,0001

La distribución de biomasa de cada fracción en la estructura total de las especies arbóreas mostró que el fuste fue siempre superior al 50% de la biomasa total, las fracciones de ramas gruesas y delgadas representaron en conjunto el 28% del total y las hojas el 9% en promedio. En los arbustos el aporte de las ramas gruesas fue de entre el 50 y 80% del total y la fracción de ramas delgadas mostró la mayor variabilidad de todos los componentes entre las dos especies (Figura 2).

Se propuso realizar una regresión ponderada como método para corregir la heterocedasticidad de las estimaciones de biomasa, sin embargo este procedimiento no proporcionó una mejora importante en el ajuste de los modelos, por lo que las ecuaciones reajustadas con los pesos no fueron consideradas para el ajuste simultáneo (SUR).

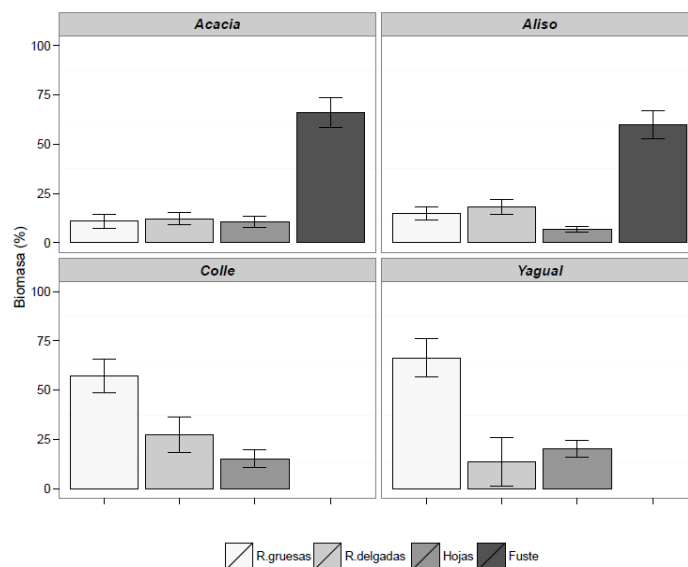


Figura 2. Proporción de biomasa de cada fracción respecto de la biomasa aérea total en las especies estudiadas.

Los sistemas de ecuaciones generados con la metodología SUR presentaron un buen ajuste en todas las fracciones y especies, todos los parámetros tuvieron un nivel de significación $>95\%$ (Tabla 4). Todos los modelos incluyeron el diámetro y la altura total como variables explicativas, y no se observó un modelo alométrico general común para todas las fracciones y especies. Más del 70% de la variación de biomasa observada en los componentes de las especies fue explicada por las variables independientes, solamente la ecuación de la fracción hojas de Colle presentó un R^2 relativamente inferior (0,499). En Acaica y Aliso los modelos de las fracciones relacionados con la copa (hojas, ramas gruesas y delgadas) tuvieron menor coeficiente de determinación respecto a las ecuaciones de fuste.

La precisión de los sistemas de ecuaciones ajustados se verificó comparando los valores de biomasa total estimada y observada en las cuatro especies (Figura 3). Los modelos de las especies arbóreas tuvieron similares porcentajes de sobreestimación e imprecisión en la estimación de la biomasa total, $4,6 \pm 16,3\%$ y $3,0 \pm 13,1\%$ en Acacia y Aliso respectivamente. Por otro lado, el sesgo del modelo de Colle fue de 8,4%, mientras que en Yagual el modelo subestima 3,8% de la biomasa aérea total, en ambas especies se observó mayor incertidumbre que en las especies arbóreas 32,6 y 28,8%.

Además se analizó la distribución de residuos y precisión de las estimaciones respecto a las distintas clases diamétricas. En todas las especies el error de estimación aumenta en las colas de la distribución, siendo menor en los cuantiles 2 y 3, donde se encuentran la mayor cantidad de individuos (Figura 4).

Tabla 4. Modelos de biomasa generados con ajuste simultáneo (SUR) para las cuatro especies. W_t : Biomasa total (kg); W_f : Biomasa del fuste (kg); W_{rg} : Biomasa de ramas gruesas (kg); W_{rd} : Biomasa de ramas delgadas (kg); W_h : Biomasa de hojas (kg); H_t : altura total (m); DBH : diámetro a la altura del pecho (cm); d : diámetro a 30cm del suelo (cm); RMSE: raíz media del cuadrado del error; R^2 -ajust.: coeficiente de determinación ajustado.

Especie/componente	modelo	RMSE	R^2 -ajust
Acacia			
Fuste	$W_f = 0,083622 * DBH^{1,826783} * H_t^{0,689611}$	20,87	0,934
Ramas gruesas	$W_{rg} = 0,101503 * DBH^2 - 1,044164 * H_t$	12,18	0,714
Ramas delgadas	$W_{rd} = 0,144577 * DBH^2 - 0,094715 * DBH * H_t$	11,57	0,735
Hojas	$W_h = 0,119735 * DBH^2 - 0,075536 * DBH * H_t$	9,71	0,732
Biomasa total		44,34	0,906
Aliso			
Fuste	$W_f = 0,1483 * DBH^2 + 0,003688 * DBH^2 * H_t$	4,66	0,946
Ramas gruesas	$W_{rg} = 0,080183 * DBH^2 - 0,569041 * H_t$	3,48	0,807
Ramillas delgadas	$W_{rd} = 0,085229 * DBH^2 - 0,483528 * H_t$	3,18	0,852
Hojas	$W_h = 0,033436 * DBH^2 - 0,214716 * H_t$	1,05	0,890
Biomasa total		9,72	0,938
Colle			
Ramas gruesas	$W_{rg} = 0,01489 * d^2 * H_t$	1,84	0,863
Ramas delgadas	$W_{rd} = 0,006169 * d^2 * H_t$	1,13	0,699
Hojas	$W_h = 0,003957 * d^2 * H_t$	0,97	0,499
Biomasa total		2,09	0,925
Yagual			
Ramas gruesas	$W_{rg} = 0,014069 * d^2 * H_t$	1,54	0,956
Ramillas delgadas	$W_{rd} = -0,072304 * d^2 + 0,17204 * d^2 * H_t$	0,69	0,978
Hojas	$W_h = 0,003651 * d^2 * H_t$	0,50	0,920
Biomasa total		2,49	0,973

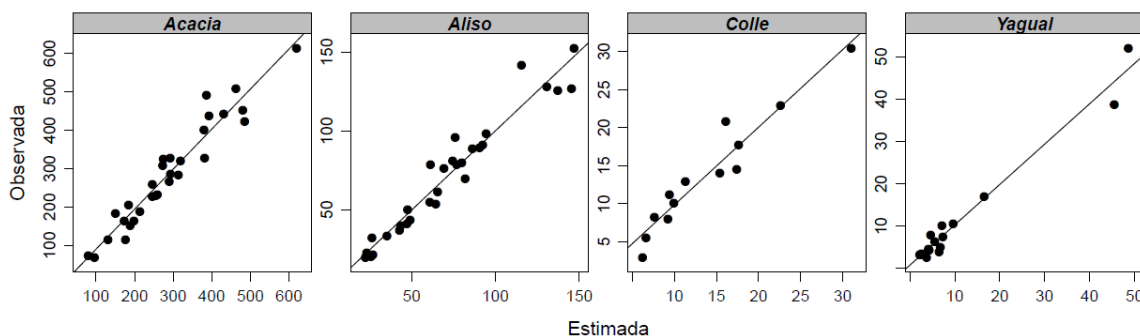


Figura 3. Valores observados y estimados de biomasa aérea total (kg) para las cuatro especies.

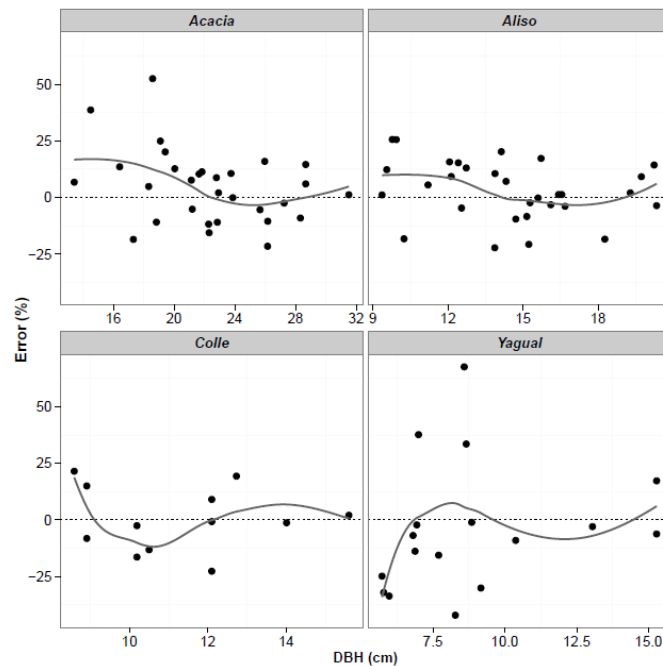


Figura 4. Porcentaje de error de predicción de biomasa aérea total por el diámetro en cuatro especies leñosas de la ecorregión andina del Ecuador. En Colle y Yagual el diámetro (cm) es el diámetro basal a 30 cm del suelo.

5. Discusión

A pesar de la gran cantidad de modelos alométricos para estimar la biomasa que han sido publicados para su aplicación en determinadas especies, tipos de bosque, sitios específicos, regiones biogeográficas o biomas basados en relaciones alométricas, solo una pequeña proporción corresponden a la región andina y sus estribaciones (FEHSE et al., 2002; GIBBON et al., 2010; RIOFRÍO, 2007; SIERRA et al., 2007). Además la mayoría de ellas fueron generados para diferentes ecosistemas forestales complejos con características y dinámicas concretas, por lo que su aplicación es limitada en sistemas agroforestales con distinta composición, estructura y densidad de especies (JOSE & BARDHAN, 2012; NAIR, 2011).

En este estudio los modelos de biomasa ajustados simultáneamente con un sistema de ecuaciones aparentemente no relacionadas (SUR) presentaron altos coeficientes de determinación. En los modelos de todas las especies los coeficientes relacionados con el diámetro fueron positivos tanto para las fracciones como para la biomasa total, mientras que en los modelos donde se incluye la altura los coeficientes fueron casi siempre negativos. Esto indica que la biomasa de todas las fracciones se incrementa conforme aumenta el diámetro de las especies y la inclusión de la altura dentro de los modelos nos puede indicar las condiciones de competencia de los árboles y la calidad del sitio, lo que implica la interacción entre el nivel de tolerancia a la sombra de las especies y los atributos del rodal y del sitio (LAMBERT et al., 2005).

La combinación de las dos variables dentro de un modelo mejora su capacidad de predicción y amplía el rango para su potencial aplicación, considerando también que son variables comunes y fáciles de obtener en sistemas agroforestales donde la apertura del dosel

y la baja densidad de individuos influye en el crecimiento de las especies (COLE & EWEL, 2006; NAIR 2011).

Aunque la bondad del ajuste de los modelos generados no fue muy diferente respecto a otros publicados anteriormente para Acacia y Aliso (RIOFRÍO, 2007), los modelos aditivos desarrollados con la regresión SUR tienen la ventaja de que su ecuación general resulta de la suma de las fracciones de biomasa, confiriéndole consistencia al sistema de ecuaciones. Además los modelos desarrollados con este procedimiento resuelven los problemas de multicolinealidad que presentan los componentes de la biomasa (PARRESOL, 1999; PARRESOL, 2001).

Las diferentes proporciones de biomasa entre las fracciones de las especies refleja sus diferencias morfológicas y atributos ecológicos, sin embargo solo se puede apreciar una sección de estas relaciones alométricas comprendida entre rango de valores con que fueron ajustados los modelos, el uso fuera de estos límites no es recomendable debido a que estas relaciones no son constantes y cambian de acuerdo al tamaño, edad del árbol y especie (CHAVE et al., 2005, COLE & EWEL 2006), por tanto predicciones de biomasa basadas en una alometría constante incrementarían los errores de precisión en las estimaciones de la misma.

Por otra parte, la mayor variabilidad de biomasa observada en las especies arbustivas respecto a la relación entre altura y las fracciones de la copa, sobre todo en los individuos de mayores dimensiones, se puede explicar por el uso de estas especies como fuente de leña y forraje para animales (GRIJALVA et al., 2010), lo que produce cambios en las relaciones alométricas entre individuos, dependiendo del tipo e intensidad de manejo al que están sometidos.

En cuanto a la corrección de la heterocedasticidad, encontrar una función adecuada para representar con precisión la varianza de los residuales en las estimaciones de las fracciones de biomasa resulta complicado cuando se dispone de un número pequeño de muestras (BI et al., 2004; COMIER et al., 1992). Sin embargo, ya que el sesgo de los modelos es inferior en los cuantiles con el mayor número de individuos los modelos pueden ser aplicados con mayor eficiencia dentro de estas clases diamétricas. Otra manera de solventar los problemas de heterocedasticidad podría ser realizar la transformación logarítmica de los datos, sin embargo este procedimiento requiere una retransformación posterior para obtener los valores de las estimaciones, lo que no garantiza que se mantenga la aditividad del sistema de ecuaciones.

A pesar de las limitaciones en la aplicación y los errores de estimación que puedan producir los modelos alométricos específicos para especies basados en un pequeño número de muestras (CHAVE et al., 2004), debido a su facilidad de aplicación los modelos generados son herramientas útiles para la evaluación de sostenibilidad de sistemas agroforestales y programas de incentivos para la conservación de bosques y sistemas forestales (CORRAL, 2011) en iniciativas gubernamentales y no gubernamentales a nivel nacional.

La generación de modelos específicos para la diversidad de especies que se pueden encontrar en sistemas agroforestales con distinta composición y estructura en los ecosistemas andinos, resulta bastante complejo. Para ello se pueden usar modelos generales empíricos o teóricos que han sido validados y verificados en diferentes situaciones y ecosistemas (ALVAREZ et al., 2012; CHAVE et al., 2005; VIEILLEDENT et al., 2012), considerándolos

como una primera aproximación para la estimación de biomasa arbórea cuando no existen modelos regionales o específicos disponibles.

6. Conclusiones

Los modelos alométricos generados con la metodología SUR son capaces de estimar la biomasa de especies arbóreas y arbustivas en sistemas agroforestales de la región andina del Ecuador, de manera precisa y garantizando la aditividad de las estimaciones. Adicionalmente, las características estructurales de los modelos mejoran la capacidad de predicción y amplían su rango de aplicación, debido a que incluyen la altura total y el diámetro como variables explicativas, esto puede expresar mejor la variabilidad de biomasa en función de las condiciones de competencia, características del rodal y sitio. Dadas estas características los modelos pueden ser aplicados en programas e iniciativas a nivel nacional y regional donde se requiere un método eficaz y de fácil aplicación para contabilizar y evaluar la producción y evolución de biomasa en diferentes sistemas de usos de la tierra con el fin de promover incentivos hacia comunidades por servicios ecosistémicos prestados.

7. Agradecimientos

A la Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación del Ecuador por el soporte financiero. A Wilson Lara por los comentarios y sugerencias para mejorar este artículo.

8. Bibliografía

ALVAREZ, E.; DUQUE, A.; SALDARRIAGA, J.; CABRERA, K.; DE LAS SALAS, G.; DEL VALLE, I.; LEMA, A.; MORENO, F.; ORREGO, S. & RODRÍGUEZ, L. 2012. Tree above-ground biomass allometries for carbon stocks estimation in the natural forests of Colombia. *For. Eco. Manag.* 267:297–308.

ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J. G.; RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R. & ROJO-ALBORECA, A. 2007. Resolución de problemas del ajuste simultáneo de sistemas de ecuaciones: heterocedasticidad y variables dependientes con distinto número de observaciones. *Cuad. Soc. Esp. Cienc. For.* 42:35–42.

ARÉVALO VIZCAINO, V. 2009. Chakras, bosques y ríos: El entramado de la biocultura amazónica. Publicación Micelánea N°148. INIAP. Abya-Yala, Quito, Ecuador.

BAQUERO, F.; SIERRA, R.; ORDÓÑEZ, L.; TIPÁN, M.; ESPINOSA, L.; RIVERA, M. B. & SORIA, P. 2004. La vegetación de los Andes del Ecuador. EcoCiencia/CESLA/EcoPar/MAG SIGAGRO/CDC-Jatun Sacha/IGM.

BI, H.; TURNER, J. & LAMBERT, M. 2004. Additive biomass equations for native eucalypt forest trees of temperate Australia. *Trees* 18:467–479.

CALDERÓN, M. R. Y LOZADA, V. S. 2010. Determinación de biomasa y contenido de carbono en plantaciones forestales de *Polylepis incana* y *Polylepis reticulata*. Trabajo fin de

Carrera Ingeniería Ambiental. Escuela Politécnica Nacional del Ecuador. Disponible en, <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/2060> [Acceso, Julio 10, 2012] .

CHAVE, J.; ANDALO, C.; BROWN, S.; CAIRNS, M. A; CHAMBERS, J. Q.; EAMUS, D.; FÖLSTER, H.; FROMARD, F.; HIGUCHI, N.; KIRA, T.; LESCURE, J.-P.; NELSON, B. W.; OGAWA, H.; PUIG, H.; RIÉRA, B. & YAMAKURA, T. 2005. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia* 145:87–99.

CHAVE, J.; CONDIT, R.; AGUILAR, S.; HERNANDEZ, A.; LAO, S. & PEREZ, R. 2004. Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates. *Phil. Trans. R. Soc. Lon. Series B, Biological sciences* 359:409–20.

CHECA, X.; RAMOS, R. & GRIJALVA, J. 2010. Caracterización de sistemas agroforestales en la subregión sierra central del Ecuador. XII Congreso Ecuatoriano de Ciencias del Suelo, Santo Domingo, 17-19 de noviembre.

COLE, T. G. & EWEL, J. J. 2006. Allometric equations for four valuable tropical tree species. *For. Eco. Manag.* 229:351–360.

CORMIER, K.; REICH, R.; CZAPLEWSKI, R. & BECHTOLD, W. 1992. Evaluation of weighted regression and sample size in developing a taper model for loblolly pine. *For. Eco. Manag.* 53:65–76.

CORRAL, A. 2011. Metodología de monitoreo para las áreas de conservación de Socio Bosque. Ministerio del Ambiente del Ecuador, Programa Socio-Bosque. Disponible en, <http://sociobosque.ambiente.gob.ec/files/monitoreometodo2011.pdf>. [Acceso, Octubre 30, 2012].

FEHSE, J.; HOFSTEDDE, R.; AGUIRRE, N.; PALADINES, C.; KOOIJMAN, A. & SEVINK, J. 2002. High altitude tropical secondary forests: a competitive carbon sink?. *For. Eco. Manag.* 163:9–25.

GIBBON, A.; SILMAN, M. R.; MALHI, Y.; FISHER, J. B.; MEIR, P.; ZIMMERMANN, M.; DARGIE, G. C.; FARFAN, W. R. & GARCIA, K. C. 2010. Ecosystem Carbon Storage Across the Grassland–Forest Transition in the High Andes of Manu National Park, Peru. *Ecosystems* 13:1097–1111.

GRIJALVA, J.; RIOFRÍO, J.; ANDRADE, D. & RAMOS, R. 2010. Árboles y Arbustos para la conservación de microcuencas altas andinas y adaptación al cambio climático. Boletín divulgativo N°369, INIAP. NINA Comunicaciones, Quito, Ecuador. Disponible en, http://www.iniap.gob.ec/nsite/images/documentos/Arboles_y_arbustos_para_la_conservaci%C3%B3n_de_microcuencas_y_adaptaci%C3%B3n_al_cambio_climatico..pdf. [Acceso, Noviembre 15, 2012].

HENNINGSEN, A. & HAMANN, J. D. 2012. Package "systemfit": Estimating Systems of Simultaneous Equations. CRAN Version 1.1-12.

- JOSE, S. & BARDHAN, S. 2012. Agroforestry for biomass production and carbon sequestration: an overview. *Agroforestry Syst.* 86:105–111.
- LAMBERT, M.; UNG, C. & RAULIER, F. 2005. Canadian national tree aboveground biomass equations. *Can. J. For. Res.* 35:1996–2018.
- NAIR, P. K. R. 2011. Carbon sequestration studies in agroforestry systems: a reality-check. *Agroforestry Syst.* 86:243–253.
- PARRESOL, B. 1999. Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons. *Forest Science* 45:573–593.
- PARRESOL, B. R. 2001. Additivity of nonlinear biomass equations. *Canadian Journal of Forest Research* 31:865–878.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM. 2010. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation Statistical Computing. Vienna, Austria.
- RIOFRÍO, J. 2007. Cuantificación de carbono almacenado en dos sistemas agroforestales en la estación experimental Santa Catalina - INIAP, Ecuador. Trabajo Fin de Carrera Ingeniería Agrónoma. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- RUIZ-PEINADO, R.; DEL RIO, M. & MONTERO, G. 2011. New models for estimating the carbon sink capacity of Spanish. *Forest Systems* 20:176–188.
- SIERRA, C. A.; DEL VALLE, J. I.; ORREGO, S. A.; MORENO, F. H.; HARMON, M. E.; ZAPATA, M.; COLORADO, G. J.; HERRERA, M. A.; LARA, W.; RESTREPO, D. E.; BERROUET, L. M.; LOAIZA, L. M. & BENJUMEA, J. F. 2007. Total carbon stocks in a tropical forest landscape of the Porce region, Colombia. *For. Eco. Manag.* 243:299–309.
- TORQUEBIAU, E. 1992. Are tropical agroforestry home gardens sustainable? *Agri. Ecosystems Envir.* 41:189–207.
- VIILLEDENT, G.; VAUDRY, R.; ANDRIAMANOHISOA, S. F. D.; RAKOTONARIVO, O. S.; RANDRIANASOLO, H. Z.; RAZAFINDRABE, H. N.; RAKOTOARIVONY, C. B.; EBELING, J. & RASAMOELINA, M. 2012. A universal approach to estimate biomass and carbon stock in tropical forests using generic allometric models. *Ecological applications* 22:572–83.